



Escola de Camins

Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports
UPC BARCELONATECH

**CAMPO DE VELOCIDADES
GENERADO POR LA PROPULSIÓN
DE BUQUES. ENSAYOS DE
LABORATORIO**

Trabajo realizado por:

Aleix Jaquet Pous

Dirigido por:

Francesc Xavier Gironella I Cobos

Anna Mujal Colilles

Grado en:

Ingeniería de Obras Públicas

Barcelona, 15 de junio de 2015

Departamento de Ingeniería Hdráulica, Marítima y
Ambiental

TRABAJO FINAL DE GRADO

Índice

1- Resumen	5
2- Introducción	6
3- Fundamentos teóricos.....	8
3.1- Modelos físicos	8
3.2- Trayectoria y línea de corriente.....	10
3.3- Flujos	11
3.4- Velocidades en el medio	13
5- Descripción del modelo.....	18
5.1- Características de la piscina	18
5.2- Características de los elementos.....	20
6- Metodología	24
6.1- Posicionamiento ADV's	24
6.1.1- Componente X	24
6.1.2- Componente Y.....	26
6.1.3- Componente Z.....	28
6.2- Fases temporales	31
6.3- Rpm de los motores.....	33
6.4- Análisis de los datos	35
6.5- Tratamiento de los datos mediante MATLAB	36
7- Resultados	37
7.1- Velocidades.....	37
7.2- Escenario1: 400 rpm.....	39
7.3- Escenario 2: 350 rpm	49
7.4- Escenario 3: 300 rpm	57
7.5- Comparación resultados experimentales – propuestas teóricas	60
7.6- Velocidades de fondo	61
7.7- Comparación velocidad máxima fondo.....	64
7.8- Análisis de los factores influyentes	65
8- Conclusiones	66
9- Agradecimientos.....	68
10- Referencias bibliográficas	69

Índice de Imágenes

Imagen 1. Allure of the Seas entrando en Barcelona

Imagen 2. Piscina de experimentos

Imagen 3. Motores y estructura de soporte

Imagen 4. Hélice de 4 palas

Imagen 5. ADV utilizados, marca Nortek

Imagen 6. Eje X piscina

Imagen 7. Eje Y piscina

Imagen 8. Eje Z piscina

Imagen 9. Vista sumergida eje Z

Índice de figuras

Figura 1. Línea de corriente

Figura 2. Trayectoria

Figura 3. Flujo laminar

Figura 4. Flujo turbulento

Figura 5. Esquema de chorro generado por una hélice. (ROM, 2011)

Figura 6. Esquema de la zona de trabajo

Figura 7. Esquema funcionamiento ADV

Figura 8. Posición sensores eje X

Figura 9. Posición sensores eje Y

Figura 10. Posición sensores eje Z

Figura 11. Velocidades en el plano $X = 2.5D_p$

Figura 12. Velocidades en el plano $X = 5D_p$

Figura 13. Velocidades en el plano $X = 7.5D_p$

Figura 14. Velocidades en el plano $X = 10Dp$

Figura 15. Velocidades en el plano $X = 15Dp$

Figura 16. Velocidades en el plano $Z = 6 \text{ cm}$

Figura 17. Velocidades en el plano $Z = 16 \text{ cm}$

Figura 18. Velocidades en el plano $Z = 26 \text{ cm}$

Figura 19. Velocidades en el plano $Z = 46 \text{ cm}$

Figura 20. Velocidades en el plano $Y = -0.0 \text{ cm}$

Figura 21. Velocidades en el plano $Y = 0.0 \text{ cm}$

Figura 22. Velocidades en el plano $Y = -30.0 \text{ cm}$

Figura 23. Velocidades en el plano $Y = 31.0 \text{ cm}$

Figura 24. Velocidades en el plano $Y = -76.5 \text{ cm}$

Figura 25. Velocidades en el plano $Y = 76.5 \text{ cm}$

Figura 26. Velocidades en el plano $X = 2.5Dp$ (350 rpm)

Figura 27. Velocidades en el plano $X = 2.5Dp$ (400 rpm)

Figura 28. Velocidades en el plano $X = 5Dp$ (350 rpm)

Figura 29. Velocidades en el plano $X = 5Dp$ (400 rpm)

Figura 30. Velocidades en el plano $Y = 0.0 \text{ cm}$ (350 rpm)

Figura 31. Velocidades en el plano $Y = 0.0 \text{ cm}$ (400 rpm)

Figura 32. Velocidades en el plano $Y = 31.0 \text{ cm}$ (350 rpm)

Figura 33. Velocidades en el plano $Y = 31.0 \text{ cm}$ (400 rpm)

Figura 34. Velocidades en el plano $Z = 6 \text{ cm}$ (350 rpm)

Figura 35. Velocidades en el plano $Z = 6 \text{ cm}$ (400 rpm)

Figura 36. Velocidades en el plano $Z = 26 \text{ cm}$ (350 rpm)

Figura 37. Velocidades en el plano $Z = 26 \text{ cm}$ (400 rpm)

Figura 38. Velocidades en el plano $X = 2.5Dp$ (300 rpm)

Figura 39. Velocidades en el plano $X = 5Dp$ (300 rpm)

Figura 40. Velocidades en el plano $X = 7.5Dp$ (300 rpm)

Figura 41. Velocidades en el plano $Z = 26$ cm (300 rpm)

Figura 42. Eje de variaciones de la velocidad en el fondo a una altura de 6 cm (400 rpm)

Figura 43 Variaciones de la velocidad en el fondo a una altura de 6 cm (400 rpm)

Figura 44. Eje de variaciones de la velocidad en el fondo a una altura de 26 cm (400 rpm)

Figura 45. Variaciones de la velocidad en el fondo a una altura de 26 cm (400 rpm)

Índice de fórmulas

Fórmula [1]. Semejanza de Froude

Fórmula [2]. Número de Reynolds

Fórmula [3]. Diámetro específico en lámina libre

Fórmula [4]. Velocidad del chorro de agua según Romisch

Fórmula [5]. Velocidad del chorro de agua según Hamill

Fórmula [6]. Velocidad del chorro de agua según Stewart

Fórmula [7]. Coeficientes fórmula de velocidad Stewart

Fórmula [8]. Velocidad del chorro de agua según Hashmi

Fórmula [9]. Coeficientes fórmula de velocidad Hashmi

Fórmula [10]. Simplificación velocidad del chorro

Fórmula [11]. Velocidad del chorro de agua según EAU y Pianc

Fórmula [12]. Velocidad de fondo según EAU

Fórmula [13]. Velocidad del chorro de agua según ROM 2 011

Fórmula [14]. Velocidad de fondo según ROM 2011

Fórmula [15]. Principio efecto doppler

1- Resumen

Este trabajo de final de grado es una tesina basada en el estudio del campo de velocidades que generan dos hélices en el agua. El estudio se realiza ya que en los grandes puertos marítimos es común que estas velocidades generen fuertes corrientes que arrastran sedimento creando grandes erosiones y depósitos en el lecho marino que hacen peligrar la estabilidad de los muelles que configuran las dársenas y la seguridad de la navegabilidad de los buques respectivamente.

Este estudio se ha realizado por medio de un modelo reducido en la piscina de ensayos LaBassA que se encuentra en el Laboratorio de Ingeniería Marítima de la Escuela de Caminos de la Universidad Politécnica de Barcelona. Se ha reproducido el sistema de propulsión, compuesto por dos hélices, del barco que más frecuenta una dársena real que sufre estos problemas de socavación/deposición. La piscina de ensayos, con 12m de longitud, 4.60m de ancho y apta para un calado máximo de agua de 2.5m, ha permitido realizar los experimentos a una escala geométrica 1/25.

Se ha experimentado con las dos hélices a tres revoluciones diferentes (300, 350 y 400 rpm), obteniendo velocidades en 240 puntos de la piscina mediante 6 *Acoustic Doppler Velocimeter* (ADV) que se distribuyeron tanto en el eje X, Y y Z para cada experimento. Por lo tanto, se realizaron 40 ensayos para cada una de las revoluciones de las hélices, es decir, un total de 120 ensayos.

Los registros obtenidos se han analizado y graficado las diferentes velocidades en los planos perpendiculares al jet de las hélices. Posteriormente se ha hecho una comparativa con las fórmulas de diferentes autores ya existentes sobre campos de velocidades generados por hélices, pudiendo probar de esta forma la bondad de estas propuestas.

2- Introducción

Hoy en día la evolución de la sociedad así como sus necesidades ha hecho aumentar el consumo de productos alrededor del mundo. Esto, ligado con el crecimiento de la construcción de medios de transporte cada vez más grandes, ha generado problemas en la mayoría de puertos, ya que una gran parte de estos productos se transportan por vía marítima. Otro aspecto importante también es el incremento del turismo ligado a los viajes con cruceros. Ambos aspectos conllevan a un necesario cambio y adaptación de usos, especialmente en infraestructuras marítimas con más de 50 años de vida que se están quedando obsoletas o inadecuadas a los cambios de uso.

Aparte de ser más grandes los buques, también sus sistemas de propulsión son más potentes, y esto es un gran problema ya que dentro de la zona protegida del puerto, se pueden generar corrientes mayores que las de diseño. Este suceso es negativo sobre todo en las zonas cerca de los muelles donde estas corrientes pueden remover sedimento donde se “apoyan” los muros que constituyen las dársenas. Si estas zonas desaparecen, el muro tiende a asentarse, inclinarse o llegar a colapsar con sus negativas consecuencias tanto en la seguridad y explotación como en la gestión económica del puerto. También esta arena en suspensión acaba depositándose en otras zonas del puerto impidiendo el atraque de algunos buques por falta de calado.



Imagen 1 Allure of the seas entrando en Barcelona

Como de ahora en adelante los buques seguirán siendo de gran tamaño o incluso mayores, un objetivo lógico sería reconstruir los puertos y adaptarlos para buques de mayor envergadura, aumentando calados. Ésta sería una obra muy costosa y a la vez tendría esa dársena en construcción no disponible durante un largo periodo de tiempo. Por eso, la solución más barata, cómoda y rápida sería hacer una protección en el lecho de la dársena para evitar esa erosión tan perjudicial. Y, ya de cara al futuro, las ampliaciones del puerto sí que se harán para calados muy superiores y motores mucho más potentes.

Para poder construir esa protección en el pie de la estructura, en primer lugar se necesita saber las acciones que ejercen fuerzas sobre ella. Aparte de la presión del agua, las principales fuerzas son ejercidas por las corrientes que los sistemas de propulsión generan. Por eso, el objetivo de este trabajo es caracterizar el campo de velocidades que estos buques generan en el agua para más adelante poder diseñar protecciones del lecho que cumplan con su objetivo de forma eficiente. Comentar que estos ensayos se engloban dentro de un proyecto de investigación del Programa Nacional de Proyectos de Investigación Fundamental en el marco del VI Programa Nacional de Investigación Científica, Desarrollo e Innovación Tecnológica 2008-2011, Subprograma de Proyectos de Investigación Fundamental no Orientada (BOE de 31 diciembre de 2011), con Referencia: BIA2012-38676-C03-01. Dicho proyecto, colabora con otro grupo de trabajo implicado en la modelización numérica lagrangiana con DUALSPHysics, cuya calibración se llevará a cabo por medio de estas pruebas de laboratorio.

3- Fundamentos teóricos

3.1- Modelos físicos

La teoría de los modelos físicos se basa en que a partir de las magnitudes fundamentales, longitud (L), tiempo (t) y masa (M), se puede reducir un prototipo a un modelo siguiendo transformaciones como las que hay a continuación:

$$L_p = A * L_m ; t_p = B * t_m ; M_p = C * M_m ; [m \text{ modelo}, p \text{ prototipo}]$$

Por suerte las ecuaciones hidrodinámicas del fluido son adimensionales y por lo tanto se mantienen invariantes frente a esta transformación.

De esta manera, si se conoce el comportamiento en el modelo (sistema $L_m - t_m - M_m$) de un determinado fenómeno, teóricamente es posible deducir el de dicho fenómeno en el prototipo (sistema $L_p - t_p - M_p$), sin más que utilizar para cada magnitud el cambio de escala según los valores de los parámetros A, B y C adoptados en la transformación anterior.

En dicha transformación cada ecuación representa lo que en la teoría de modelos físicos se conoce como “semejanzas modelo-prototipo”.

- Semejanza geométrica: esta semejanza determina que la relación entre las dimensiones modelo y prototipo deben mantenerse constantes, llamando a esta relación “escala (A)”. Esta semejanza solo afecta a la forma de los objetos así como a sus rugosidades superficiales, lo cual representa una primera dificultad para que la semejanza modelo-prototipo sea exacta.

- Semejanza cinemática: la cual implica similitud entre los movimientos modelo-prototipo, esta semejanza con la anterior nos determina que las trayectorias de las partículas entre el modelo y el prototipo sean semejantes, llamando a esta relación “escala de tiempos (B)”.

- Semejanza dinámica: en las dos semejanzas anteriores se supone la constancia de la relación de masa, “escala de masas (C)”, y por lo tanto de fuerzas, pero el fluido no se puede reproducir a escala. Sus características físicas (densidad, viscosidad, etc), a efectos del modelo, cambian respecto a las que tiene en el prototipo de acuerdo con las escalas elegidas (A, B, C), esto nos aleja un poco más de la exactitud de las semejanzas que en el caso de la rugosidad superficial.

Esto es un problema ya que la relación entre las fuerzas que actúan en el prototipo (gravedad, viscosidad, tensión superficial y presión) y en el modelo no se mantiene

constante, ni su importancia en ambos sistemas es la misma.

Sin embargo, en la práctica, una “semejanza dinámica parcial”, basada en las fuerzas que predominan en cada caso es suficiente para que el modelo facilite la solución del problema.

Las semejanzas parciales, se establecen analizando cuál es la fuerza dominante en el fenómeno a estudiar, a fin de su reproducción más exacta en el modelo. En la mayoría de los ensayos hidráulicos las fuerzas de tensión superficial o elásticas son pequeñas, por lo que pueden obviarse sin errores significativos. En cambio, predominan las de gravedad y viscosidad, en especial la primera, por ello la semejanza que adopta esta fuerza como principal es la “semejanza de Froude”, que es la de mayor aplicación en hidráulica.

$$Re = \frac{\text{Inercias}}{\text{Gravedad}}$$

$$Fr_m = Fr_p$$

$$\frac{v_m}{\sqrt{gL_m}} = \frac{v_p}{\sqrt{gL_p}} \quad [1]$$

$$\frac{v_p}{v_m} = \sqrt{\frac{L_p}{L_m}} = \sqrt{\lambda_g}$$

Dónde:

L = longitud característica

v = velocidad

g = gravedad

3.2- Trayectoria y línea de corriente

En primer lugar tienen que definirse una serie de conceptos que aparecen a menudo y que son de gran importancia en este experimento. Para poder estudiar un fenómeno, en este caso un campo de velocidades, se tiene que tener un espacio bien definido con sus coordenados naturales, en el cual se dará el movimiento y se podrán diferenciar dos conceptos básicos, la trayectoria y la línea de corriente.

- Trayectoria: curva descrita por las posiciones sucesivas de una parcela o partícula del fluido en movimiento en un instante dado, siendo el vector velocidad tangente a la trayectoria.
- Línea de corriente: línea cuya tangente en cualquier punto del fluido en movimiento es paralela a la velocidad instantánea.

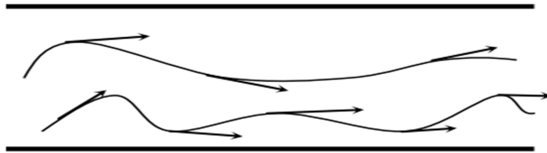


Figura 1 Línea de corriente

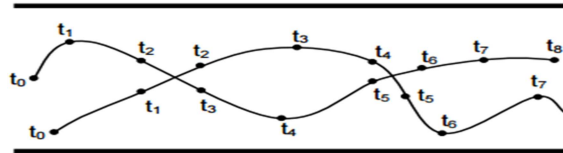


Figura 2 Trayectoria

La línea de corriente y la trayectoria no suelen coincidir, excepto en el caso de flujo estacionario.

3.3- Flujos

Otro concepto muy importante es el flujo, considerando como el conjunto de partículas en movimiento. Este flujo puede tener diferentes características dependiendo de las magnitudes de las diferentes fuerzas que actúen entre ella.

Cuando entre dos partículas en movimiento existe gradiente de velocidad, o sea que una se mueve más rápido que la otra, se crean fuerzas de fricción. Estas fuerzas de fricción tratan de introducir rotación entre las partículas en movimiento, pero al mismo tiempo la viscosidad trata de impedir la rotación. Dependiendo del valor relativo de estas fuerzas se pueden producir diferentes estados de flujo:

- Flujo laminar: las partículas se desplazan en forma de capas o láminas y tiene lugar cuando el gradiente de velocidad es bajo y la fuerza de inercia es mayor que la de fricción, por lo que, las partículas se desplazan pero no rotan. El resultado final es un movimiento en el cual las partículas siguen trayectorias definidas, y todas las partículas que pasan por un punto en el campo del flujo siguen la misma trayectoria.

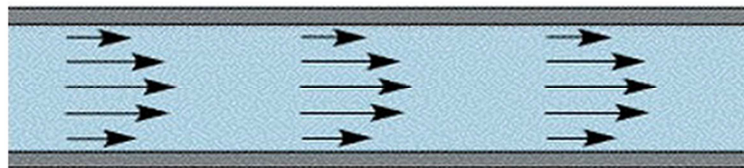


Figura 3 Flujo laminar

- Flujo turbulento: la velocidad de las partículas puede variar en el tiempo tanto en magnitud como en sentido. Se caracteriza por sus corrientes circulares, locales y aleatorias, también llamados vórtices.

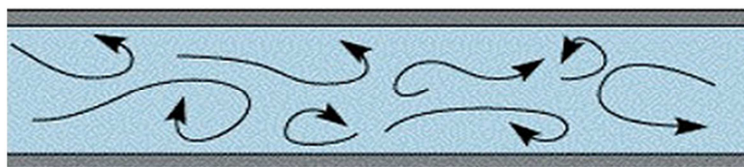


Figura 4 Flujo turbulento

Para determinar qué tipo de flujo existe Osborne (1883), que desarrolló la siguiente fórmula de la cual se puede obtener un número adimensional que relaciona las fuerzas viscosas con las fuerzas gravitacionales, y que dependiendo del rango en el que se

encuentre se dispondrá de un flujo u otro.

$$Re = \frac{D * v * \rho}{\mu} \quad [2]$$

Dónde:

Re = Número de Reynolds

D = Diámetro del conducto

v = Velocidad promedio del fluido

ρ = Densidad del fluido

μ = Viscosidad del fluido

Como en este caso el flujo circula en lámina libre (presión atmosférica), en vez de usar el diámetro del conductor se usará el diámetro efectivo (D_e):

$$D_e = 4 * \frac{\text{Área Transversal del Flujo}}{\text{Perímetro mojado}} \quad [3]$$

Para números de Reynolds inferiores a 500 se puede considerar que el flujo es laminar, y para números mayores de 2000 es flujo turbulento para canales abiertos. Entre estos dos rangos de números de Reynolds se encuentra una fase de transición.

Otro tema interesante y que en parte condiciona el experimento es el tipo de régimen que tenemos en el movimiento del agua en la piscina. Este tipo de régimen puede ser de dos maneras, estacionario y no estacionario.

Un sistema físico es si sus características no varían con el tiempo y es, por tanto, un sistema estable. En el caso de no estacionario el sistema todavía no se ha estabilizado. Esto es importante ya que cuando se quiere analizar aspectos determinados en un experimento durante un tiempo largo, es interesante que éste sea estacionario para que ese aspecto a estudiar no varíe demasiado, a no ser que lo que se quiera analizar sea la evolución de un fenómeno, en cuyo caso tendría que ser no estacionario.

El experimento que será descrito más adelante trabaja con un flujo turbulento no estacionario.

3.4- Velocidades en el medio

Una vez se conocen estos conceptos, se estudiará la velocidad del flujo de agua generado por una hélice. Para ello se usarán fórmulas propuestas por diferentes autores a lo largo de los últimos 30 años, que determinan la velocidad máxima en la cara de las hélices.

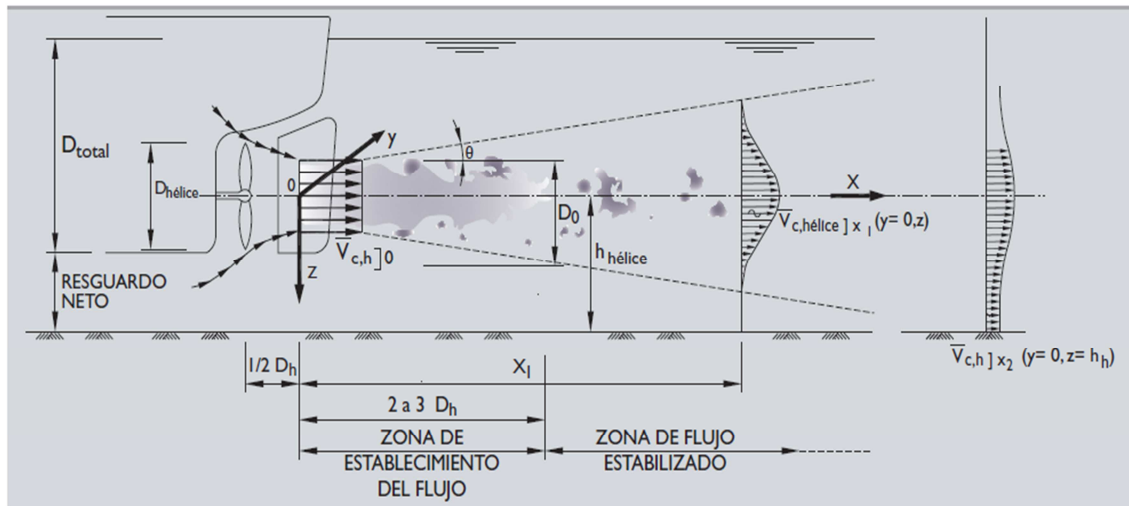


Figura 5 Esquema del charro generado por una hélice (ROM, 2011)

La mayoría de ellas son variaciones de la fórmula principal derivada de la teoría del momentum axial que genera la hélice sobre el fluido.

Dos autores desarrollaron formulas a partir de esta teoría pero con pequeñas modificaciones entre ellas.

En primer lugar Romisch (1977) que propuso la siguiente fórmula:

$$Vo = 1.59 * n * Dp * \sqrt{Ct} \quad [4]$$

Y también Hamill (1987):

$$Vo = 1.33 * n * Dp * \sqrt{Ct} \quad [5]$$

Dónde:

n = número de revoluciones de la hélice por segundo.

D_p = diámetro de la hélice en metros.

C_t = coeficiente de empuje de la hélice.

La única diferencia entre ellas es la constante que tienen al principio de la fórmula ya que tanto el número de revoluciones como el coeficiente de empuje son iguales. Por lo tanto para la misma hélice y mismo motor las formulas propuestas por ambos autores dan campos de velocidades distintas.

Debido a que no se podía comprobar cuál era la correcta porque dependiendo del caso se verificaba una y la otra no, Stewart (1992) desarrolló otra fórmula [4], parecida pero con una constante diferente para cada tipo de hélice. La fórmula es la siguiente:

$$V_o = \zeta * n * D_p * \sqrt{C_t} \quad [6]$$

Con:

$$\zeta = D_p^{-0.0686} * p'^{1.519} * \beta^{-0.323} \quad [7]$$

Dónde:

n = número de revoluciones de la hélice por segundo.

D_p = diámetro de la hélice en metros.

C_t = coeficiente de empuje de la hélice.

p' = brea de la hélice.

β = área de la pala.

Esta fórmula ya tiene en cuenta las características de la hélice, en concreto de las palas, para calcularse la constante para cada caso en particular.

Hashmi (1993), elaboró una fórmula [5] teniendo en cuenta otros factores aparte de las características de las palas.

$$Vo = Eo * n * Dp * \sqrt{Ct} \quad [8]$$

Con:

$$Eo = \left(\frac{Dp}{Dh}\right)^{-0.403} * Ct^{-1.79} * \beta^{0.744} \quad [9]$$

Dónde:

n = número de revoluciones de la hélice por segundo.

Dp = diámetro de la hélice en metros.

Ct = coeficiente de empuje de la hélice.

Dh = diámetro del eje.

β = área de la pala.

Esta fórmula aparte de tener en cuenta la características de las palas también tiene en cuenta la relación entre el diámetro de la hélice y el diámetro de su eje.

PIANC (1997) y EAU (2004) recogen una fórmula para los casos en que no se pueden conocer las características de las hélices o son muy difíciles de calcular. Según las referencias indicadas, la formulación propuesta no tiene errores mayores al 20%:

$$Vo = 0.95 * n * Dp \quad [10]$$

Dónde:

n = número de revoluciones de la hélice por segundo.

Dp = diámetro de la hélice en metros.

Esta fórmula se usa para hacer estimaciones y tener una idea de las velocidades de cualquier tipo de hélice y barco.

Estas dos asociaciones también proponen una fórmula para el cálculo de la velocidad completamente distinta a todas las anteriores, que se basa principalmente en el caudal volumétrico que mueve la hélice y la potencia que consume la hélice para generar este caudal. La EAU (2004) añade también otra ecuación para determinar la velocidad generada en el fondo.

$$V_o = C * \sqrt[3]{\frac{P}{\rho * Dp^2}} \quad [11]$$

Dónde:

P = potencia instantánea en KW.

ρ_w = densidad del agua 1,03 ton/m³.

Dp = diámetro de la hélice en metros.

C = 1,48 ya que en nuestro caso la hélice es libre (sin tobera).

Que es la velocidad esperada a la salida de la hélice y:

$$V_{max, fondo} = V_o * E * \left(\frac{Hp}{Dp}\right)^A \quad [12]$$

Dónde:

V_o = a la velocidad calculada anteriormente

E = 0.42 para buques con dos hélices

Hp = distancia entre el eje de las hélices y el fondo

Dp = diámetro de la hélice

A = -1 (para el caso de hélice simple)

Finalmente, en la ROM (2011), se propone una fórmula que determina la velocidad máxima en el fondo. Estos valores de velocidad son los más importantes a nivel constructivo ya que son el factor más determinante para el estudio de la socavación y, en consecuencia, del fallo del muelle. Esta fórmula sigue la siguiente forma:

$$V_{max, fondo} = C1 * C2 * V_o * \left(\frac{D_o}{Hh} \right) \quad [13]$$

Con:

$$V_o = 1.17 * \sqrt[3]{\frac{P}{\rho * D_o^2}} \quad [14]$$

Dónde:

C1 = factor de confinamiento del flujo por efecto del fondo marino.

C2 = factor de confinamiento del flujo por la obra de atraque.

Do = diámetro inicial del chorro (0.71 * Dp).

Hh = distancia vertical entre el eje de las hélices y el fondo marino en metros.

P = potencia suministrada por el sistema de propulsión en W.

ρ_w = densidad del agua 1,03 ton/m³.

Para calcular esta velocidad en el fondo es necesario, como en el caso anterior, calcular la velocidad de salida del chorro como se muestra anteriormente [8.1]. Esta velocidad también será comparada con las velocidades obtenidas por los autores anteriores ya que es de la misma forma que las fórmulas anteriores (PIANC (1997), EAU (2004)) aunque varía el valor de la constante del inicio y en lugar de considerar el diámetro de la hélice tiene en cuenta el diámetro del chorro que ésta genera.

5- Descripción del modelo

5.1- Características de la piscina

La piscina LaBassA, donde se han realizado los experimentos, se encuentra en el laboratorio de Ingeniería Marítima de la UPC (DEHMA-*Departament d'Enginyeria Hidràulica, Marítima i Ambiental*). Es una piscina de pequeña escala que ha permitido realizar los experimentos a una escala 1:25 respecto del prototipo real.

La piscina tiene las dimensiones siguientes:

Altura: 2.5 metros de columna de agua.

Anchura: 4.6 metros.

Longitud: 12 metros.



Imagen 2 Piscina de experimentos

Esto hace un volumen de 138 m^3 útiles de agua, de los cuales tan sólo se aprovechará 55.2 m^3 , puesto que se trabajará con una altura de 100 cm de agua, no corresponde a escala con el prototipo ya que sino esta altura habría sido de 70 cm. Se aumentó a 100 cm ya que durante el experimento de 70 cm se generaba succión aguas arriba de las hélices. Esta piscina está dotada de unas guías en la parte superior para poder mover

longitudinalmente un carro, que es el soporte de los instrumentos de medida que se explicarán más adelante. Este carro dispone de un brazo capaz de moverse tanto de forma vertical como transversal, de este modo es posible acceder a cualquier punto del espacio dentro de la piscina.

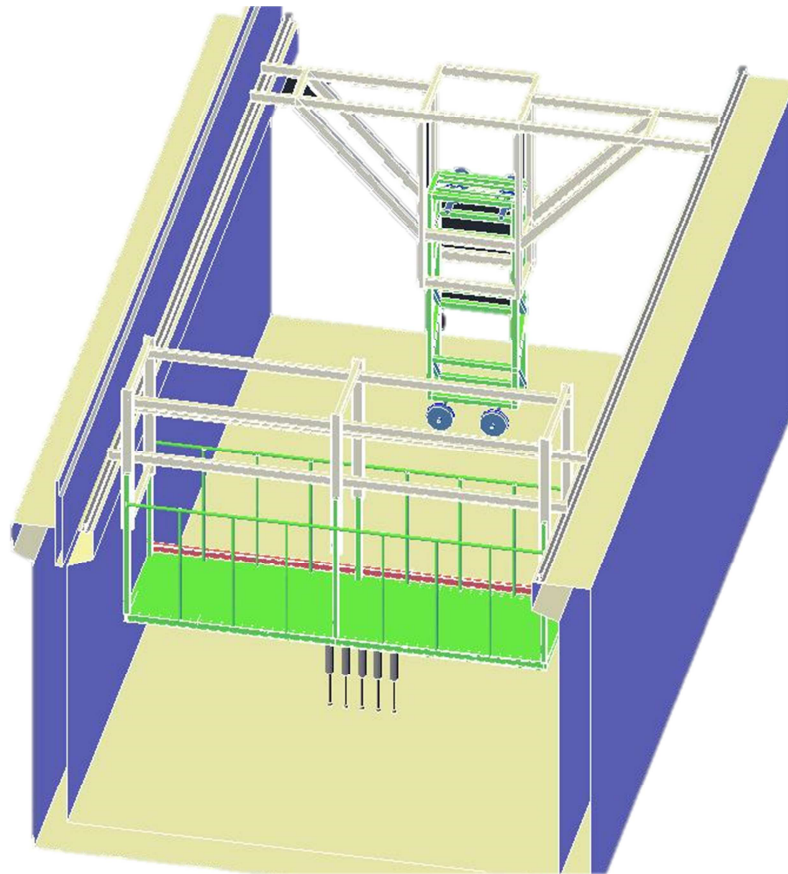


Figura 6 Esquema de la zona de trabajo

Esta piscina también dispone de un apoyo situado a un extremo para sujetar los motores que son los que generarán el campo de velocidades que se quieren estudiar. Este carro está sujeto a ambos lados del carril para que el empuje que generan las hélices no lo desplacen.

5.2- Características de los elementos

Para poder realizar estos experimentos se necesitan cinco cosas básicas, un par de motores, un par de hélices, sedimento en suspensión, agua y sensores para medir la velocidad del fluido, en este caso ADV (Acoustic Doppler Velocimeter).

5.2.1- Motores

Para generar el campo de velocidades se han utilizado dos motores eléctricos. Estos motores se encuentran en la parte superior de la estructura que sujeta las hélices para evitar problemas eléctricos en los motores debido al agua, ya que tanto las hélices como las cadenas remueven el agua y podrían salpicar. Este par de motores transmiten el movimiento de su eje al eje de las hélices mediante unas cadenas que descienden verticalmente hasta la piscina.



Imagen 3 Motores y estructura de soporte

A la vez estos motores están conectados a un ordenador el cual permite controlar las revoluciones por minuto de las hélices variando el voltaje que estos reciben.

5.2.2- Hélices

Las dos hélices son iguales, están compuesta por cuatro palas y un núcleo central, por donde pasa el eje de transmisión.



Imagen 4 Hélice de cuatro palas

Siguiendo la escala con la que se ha dimensionado el modelo, como la hélice del prototipo mide 5,6 metros de altura, la hélice tendría que medir 22,4 centímetros. Como la construcción de hélices es un proceso costoso y complicado debido a sus características geométricas, se ha adoptado por utilizar una hélice disponible en el mercado de 25,4 centímetros de la que ya se conocen todas sus características por ser una hélice comercial.

5.2.3- ADV's

Los ADV's (*Acoustic Doppler Velocimeter*) son unos sensores de medida que nos permiten conocer la velocidad del agua mediante el efecto Doppler, en este caso se han utilizado unos Nortek, en concreto el tercero empezando por la izquierda.



Imagen 5 ADV utilizados, marca Nortek

El efecto Doppler se produce cuando una fuente de vibraciones (sonidos audibles o ultrasonidos) de una frecuencia determinada está en movimiento respecto de un observador, y este reconoce una vibración de la frecuencia emitida.

Para poder aplicar este método para el cálculo de velocidades de un flujo se necesitan hacer dos suposiciones:

- 1- El flujo contiene partículas que permiten la reflexión de ondas ultrasónicas, en este caso un sedimento que posteriormente explicaremos.
- 2- La velocidad de estas partículas es la misma que la de la línea de corriente que las lleva.

El procedimiento de medida consiste en emitir ultrasonidos de una frecuencia conocida y medir la nueva frecuencia recibida después de rebotar en una partícula. La variación de esta frecuencia permite calcular la velocidad a la que se mueve esa partícula mediante la siguiente fórmula escrita por Christian Andreas Doppler en 1842:

$$F_o = F_f * \frac{V_s \pm V_o}{V_s \mp V_f} \quad [15]$$

Dónde:

F_o = Frecuencia que percibe el observador (después de rebotar)

F_f = Frecuencia que emite la fuente (fuente = ADV)

V_s = Velocidad del sonido (343 m/s)

V_o = Velocidad del observador (partículas suspendidas en el agua)

V_f = Velocidad de la fuente (en nuestro caso 0 m/s)

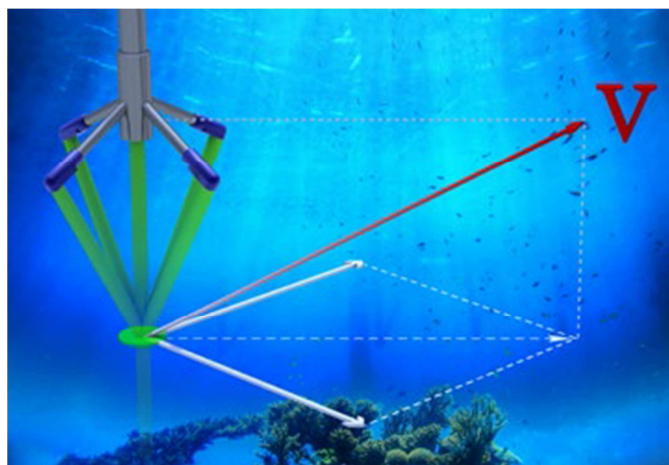


Figura 7 Esquema funcionamiento ADV

Este elemento dispone de diferentes extensiones que permiten calcular estos parámetros.

El inconveniente más grande de este método es que la velocidad de la partícula depende de la posición de la misma dentro del flujo. El sistema permite efectuar muchas medidas por segundo y se supone que estadísticamente la onda se reflejará en partículas de todas las posiciones, considerando por lo tanto la media de todas ellas como la velocidad media del flujo concentrada en un pequeño volumen del fluido.

5.2.4- Sedimento

Este sedimento incorporado (*seeding*) es el que permite que los ultrasonidos emitidos por los ADV's puedan rebotar, ya que en el agua limpia no hay partículas, y de esta forma regresar a los ADV's con una nueva frecuencia. El material utilizado como *seeding* está compuesto de partículas esféricas muy pequeñas que reflejan muy bien los sonidos y ultrasonidos gracias a su superficie, que además se mueven como el fluido y a su misma velocidad. Interesa que este sedimento este homogéneamente repartido por todo el medio y además tiene que poder mantenerse en suspensión y no sedimentarse con facilidad. Es un sedimento muy fino y que no interfiere ni en la calidad del agua ni en los mecanismos de transmisión de las hélices.

6- Metodología

Esta parte es la más laboriosa e interesante de la tesina, ya que para poder trabajar con un buen volumen de datos, así como que éstos sean fiables y buenos, es importante tener una buena metodología de trabajo así como perfección al llevarla a cabo.

Es una parte en la cual al estar en el laboratorio se puede ver realmente el experimento antes de transformarlo en simples datos y tener una pequeña idea de cómo estos van a salir, también en esta fase aparecen problemas que van sucediendo a medida que el experimento avanza y se tienen que ir resolviendo sobre la marcha.

6.1- Posicionamiento ADV's

Para obtener las velocidades en puntos bien distribuidos por el jet que generan las hélices, se han colocado 6 ADV's a lo largo de una barra perpendicular a la dirección del jet. Esta barra como el carro al cual este sujeto, son los que se irán desplazando a la hora de tomar las diferentes medidas de velocidad.

6.1.1- Componente X

La componente X es la componente paralela a la longitud de la piscina, para desplazarnos a lo largo de esta componente se hace moviendo el carro que circula por encima de las guías, se puede hacer de forma manual y por lo tanto es el movimiento más fácil.



Imagen 6 Eje X de la piscina

Se han estudiado 4 posiciones específicas, siempre a una distancia proporcional al diámetro de las hélices (D_p).

Las distancias con respecto a las hélices que se han creído más interesantes a estudiar son:

$$2.5 D_p = 63.5 \text{ centímetros}$$

$$5 D_p = 127 \text{ centímetros}$$

$$7.5 D_p = 190.5 \text{ centímetros}$$

$$10 D_p = 254 \text{ centímetros}$$

$$15 D_p = 381 \text{ centímetros}$$

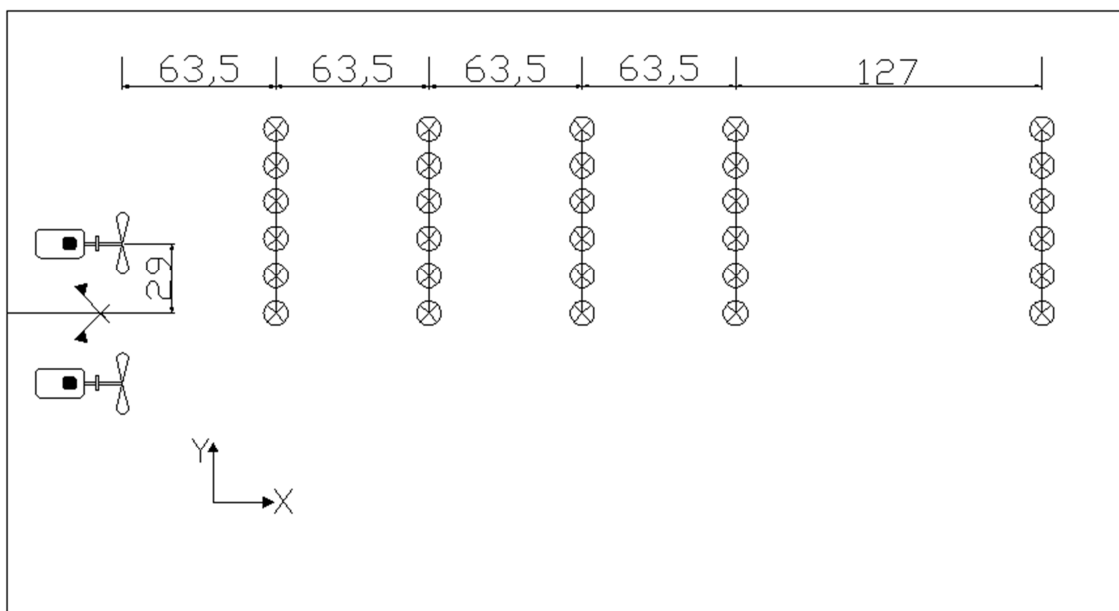


Figura 8 Posición de los sensores en el eje X (cotas en cm)

Se han tomado las posiciones más cercanas a las hélices ya que a medida que se encuentran más lejos de ellas las velocidades descienden rápidamente.

Esta posición es importante porque permite observar el alcance de ese campo de velocidades, que seguramente sea directamente proporcional a las revoluciones por minuto a las que giren las hélices.

6.1.2- Componente Y

Esta componente es perpendicular a la longitud de la piscina, y también del jet que genera las hélices. Se desplaza a la derecha o a la izquierda con un mecanismo que está sujeto al carro.



Imagen 7 Eje Y de la piscina

En la componente Y es donde están dispuestos los 6 instrumentos de medida (ADV) a unas distancias determinadas entre sí, ya que de esta forma con tan solo un movimiento ya se puede abarcar todo el ancho que interesa estudiar. Cuando se desplaza en esta dirección siempre hay un ADV (el central) que repite la posición, para poder así corroborar los cálculos en las dos situaciones y coordinarlas.

Las distancias con respecto al eje de simetría entre las dos hélices son las siguientes:

- En el caso de la Y positiva:

$ADV\ 1 = 0\ centímetros$ $ADV\ 2 = 15.5\ centímetros$

$ADV\ 3 = 31\ centímetros$ $ADV\ 4 = 46.5\ centímetros$

$ADV\ 5 = 61.5\ centímetros$ $ADV\ 6 = 76.5\ centímetros$

- En el caso de la Y negativa:

$ADV\ 1 = 0\ centímetros$ $ADV\ 2 = 15\ centímetros$

$ADV\ 3 = 30\ centímetros$ $ADV\ 4 = 45.5\ centímetros$

$ADV\ 5 = 61.0\ centímetros$ $ADV\ 6 = 76.5\ centímetros$

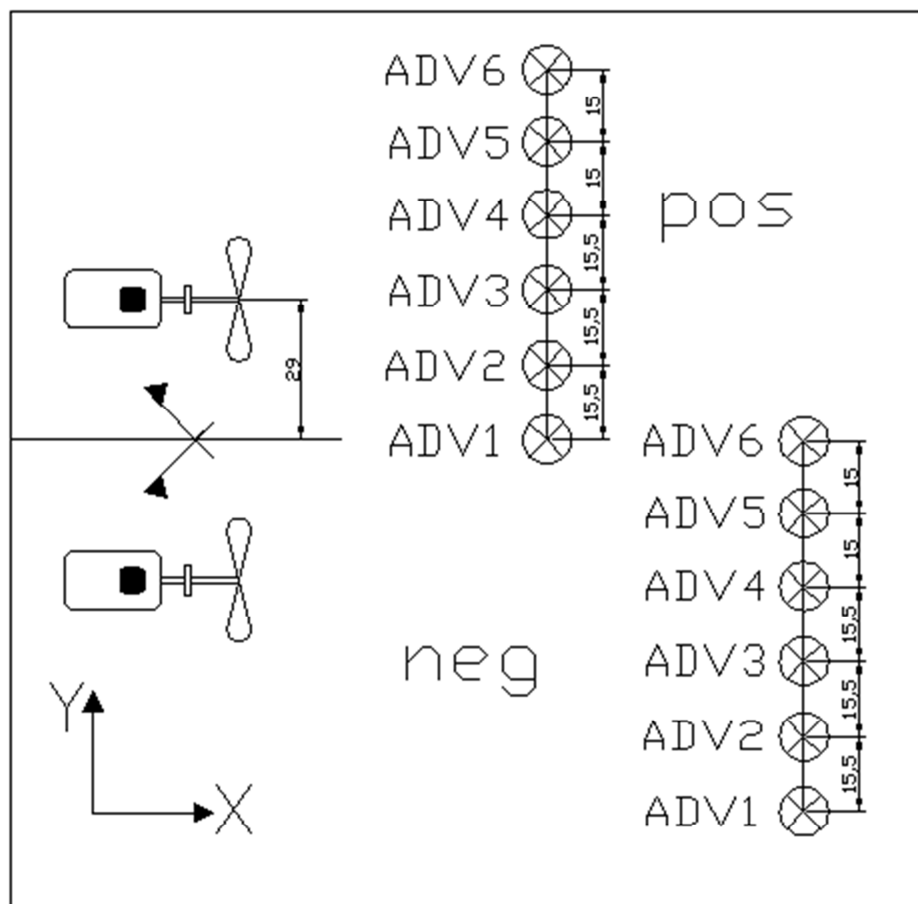


Figura 9 Posición de los sensores en el eje Y (cotas en cm)

Desplazarse en esta dirección sirve para saber el ancho que abarca el jet que generan las hélices, y conocer entonces la zona de influencia que realmente tiene, ya que al no ir en la dirección de la corriente es más difícil de suponer.

6.1.3- Componente Z

Esta componente es la vertical de la piscina, es decir la profundidad. Se desplaza hacia arriba y hacia abajo con un mecanismo sujeto al del movimiento en Y.

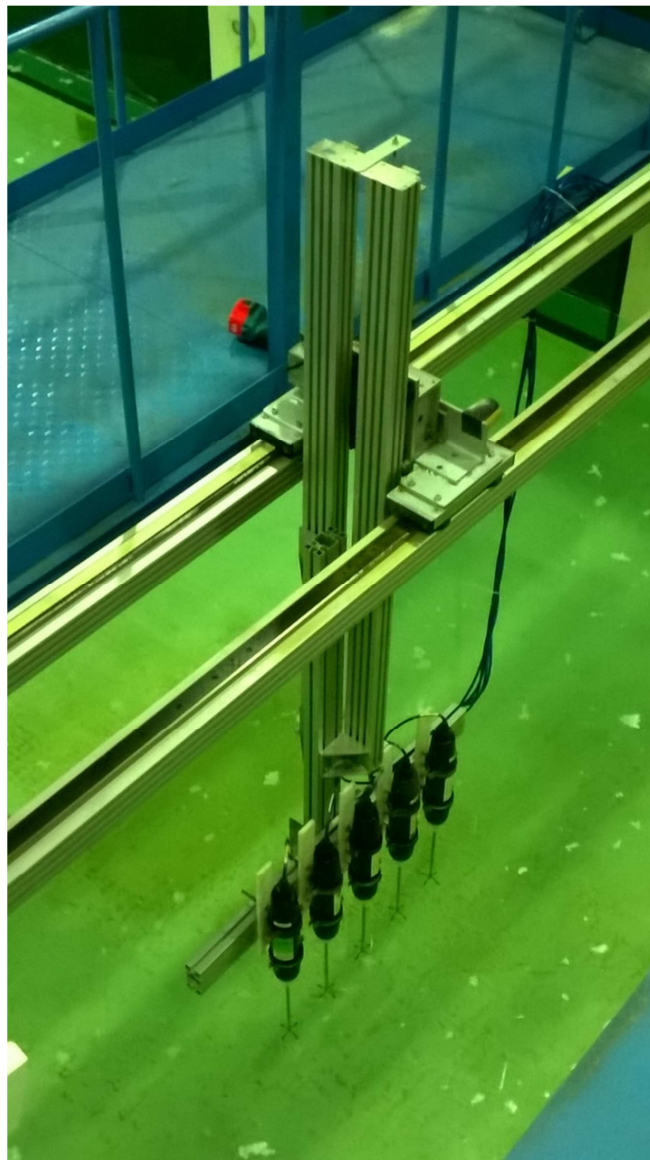


Imagen 8 Eje Z de la piscina

Sobre este eje se desplazará a 4 posiciones distintas que estudiar, que serán las siguientes:

$$Z1 = 10 \text{ centímetros}$$

$$Z12 = 20 \text{ centímetros}$$

$$Z2 = 30 \text{ centímetros}$$

$$Z3 = 50 \text{ centímetro}$$

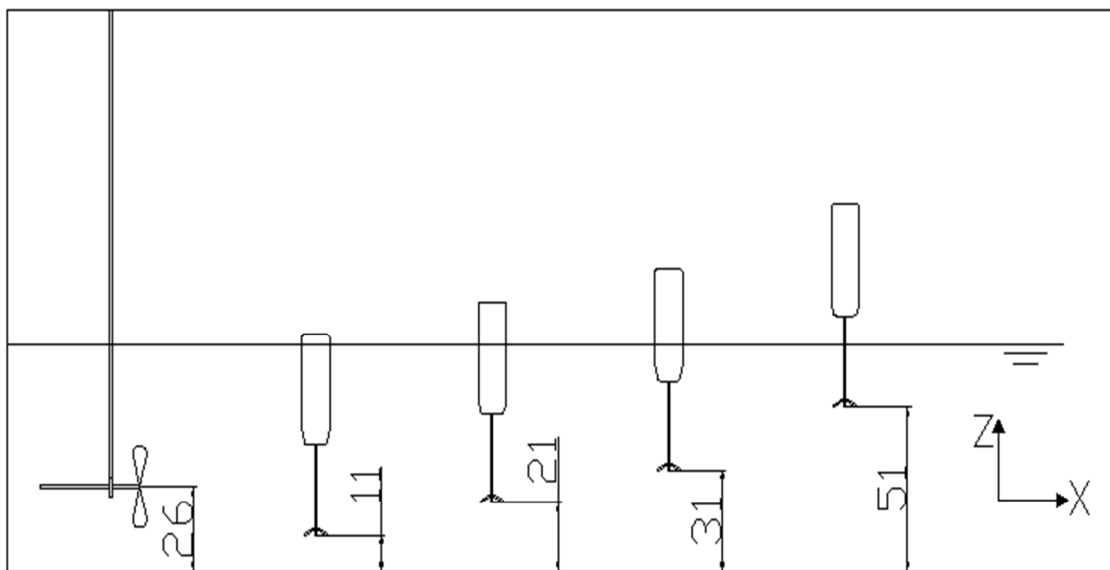


Figura 10 Posición de los sensores en el eje Z (cotas en cm)

Realmente aunque la posición de los ADV se encuentre a esa altura z respecto el fondo de la piscina, los datos que velocidad que se obtendrán se encuentran a 5 centímetros más abajo, ya que estos ADV necesitan de esa distancia vertical para realizar los cálculos de velocidades.

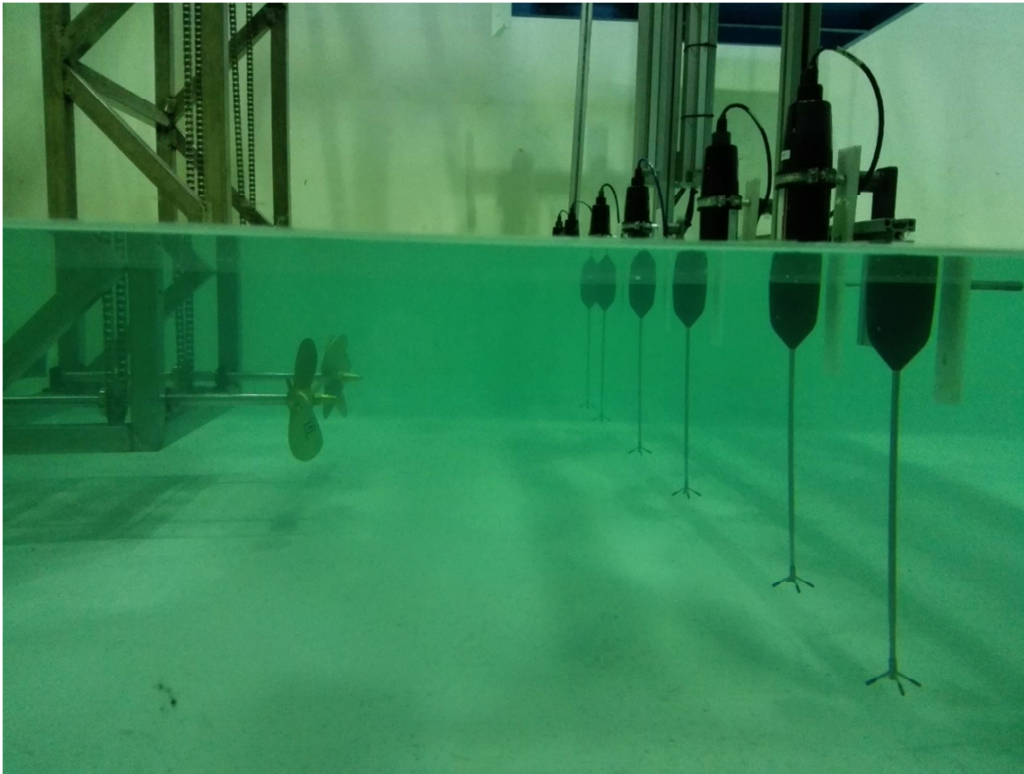


Imagen 2 Vista sumergida del eje Z

Es interesante esta componente porque de esta forma se puede saber cómo evoluciona la velocidad respecto la profundidad, y obtener realmente cuáles son las velocidades que afecta al lecho marino. Estas velocidades como las de la componente X desciende rápidamente por eso se tienen los puntos más cercanos al fondo más estudiados ya que en el punto Z2 y Z3 las velocidades son muy parecidas.

6.2- Fases temporales

Las fases temporales del experimento son un punto importante ya que puede determinar la calidad y validez de los datos de velocidades a obtener.

En primer lugar se tiene el tiempo 0, en el cual se encienden los motores y el cronómetro a la vez, se enciende el ordenador y se ponen los ADV's a leer pero sin almacenar datos todavía. Se esperan de 15 a 30 minutos a que se establezca el flujo para así obtener un movimiento estacionario del agua de la piscina antes de poner a almacenar los valores de esas velocidades.

Ya que al inicio de encender los motores el agua de la piscina está inmóvil, se necesita que el agua de toda la piscina esté en movimiento ya que al ser un sistema cerrado toda el agua fluye tanto a través de las hélices como por el fondo de la piscina en diferentes direcciones y en diferentes momentos. De esta forma también se ponen en suspensión el sedimento que antes de encender los motores está floculado en la superficie del agua o en el fondo.

En segundo lugar está el tiempo 1 = 0h 30' 00", donde el flujo ya se habrá estabilizado y se empezará a almacenar datos durante una hora como mínimo sin cambiar la posición de los ADV's en ningún momento.

Los datos se almacenan instantáneamente en un ordenador al cual están conectados estos ADV's.

Una vez pasado este tiempo está el tiempo 2 = T1 + 1h, en el cual se cambia la posición X de los ADV's y se espera a que el flujo se vuelva a estabilizar con la nueva posición del carro, este proceso dura entre 5 y 10 minutos.

Se desplaza en la componente X ya que se puede realizar manualmente desde arriba de la piscina de forma rápida y precisa.

En este caso se espera menos tiempo que al inicio del experimento ya que el agua al estar en movimiento en su totalidad solo tendría que adaptar su nueva trayectoria y eso ocupa menos tiempo.

Tiempo 3 = T2 + 10', se vuelven a poner los ADV's en modo de almacenaje de datos y se espera durante otra hora como mínimo antes de volver a cambiar de posición.

El tiempo 4 = $T3+1h$, se para de almacenar datos, y durante otros diez minutos se cambia de nuevo la posición X de los ADV's y se espera a que se vuelva a estabilizar el flujo.

El Tiempo i = Repetir tantas veces como posiciones se quieran analizar el paso 3 y 4.

Finalmente una vez pasada la última hora de almacenaje de datos se paran los motores y se toma nota de todos los tiempos y posiciones analizados.

Como es imposible realizar todas las mediciones en las distintas posiciones seguidas se divide por partes donde se fija la componente Y y la componente Z, porque son las más difíciles de mover, y se realiza los desplazamientos por los diferentes puntos de la componente X ya que se puede hacer de forma manual rápida y precisa.

6.3- Rpm de los motores

En estos ensayos en la piscina se trabaja con tres grupos de experimentos diferentes, solo con una diferencia entre ellos, las revoluciones de los motores. En todo momento se ha mantenido la distancia de las hélices al fondo (xx cm desde el eje de la hélice). Ambos motores se han hecho girar a la misma revolución. Lógicamente, para maniobrar, el barco dispone de más estrategias. Los diferentes grupos son 300, 350 y 400 revoluciones por minuto, y se obtendrán datos de velocidades en las mismas posiciones para cada una de ellos.

Se han escogido estas revoluciones ya que eran unas buenas revoluciones de trabajo para los motores eléctricos y para generar velocidades de flujo en la hélice del mismo orden que en el prototipo. A 300 revoluciones por minuto los motores trabajaban perfectamente y se obtienen valores de velocidad suficientemente elevados para generar un flujo estacionario en la piscina y poder ser ya estudiado. A 400 revoluciones por minuto se lleva el motor un poco más al límite manteniendo un buen comportamiento y permitiendo obtener valores de velocidad para condiciones más extremas. El experimento a 350 revoluciones por minuto se ha hecho para ver como evolucionaba el campo de velocidades en relación al número de revoluciones.

Las revoluciones de los motores eran calculadas en relación al voltaje que estos recibían de la fuente de alimentación siguiendo la siguiente fórmula:

$$Rpm = 0.04 + V/0.0074$$

Dónde:

Rpm = revoluciones por minuto.

V = voltaje suministrado.

Estas revoluciones del eje del motor eran transmitidas mediante cadenas a los ejes de las hélices, ambos ejes tienen piñones con el mismo número de dientes, por lo tanto el número de vueltas del eje del motor se correspondían al mismo número de vueltas en el eje de las hélices.

Es interesante saber qué voltaje consume el motor para calcular su potencia. Sabiendo que éste consume una intensidad de 4.5 amperios aproximadamente a partir de la siguiente fórmula se pueden obtener las potencias asociadas a cada experimento.

$$P = V * I * \cos \varphi$$

Dónde:

P = potencia consumida por el motor (W)

I = intensidad consumida por el motor (A)

V = voltaje (V)

Cos φ = factor de potencia (0.9)

6.4- Análisis de los datos

Después de registrar datos durante una hora y almacenarlos, para cada una de las 240 posiciones diferentes, se obtiene un archivo en el cual se dispone de las velocidades en las tres componentes. Además de las velocidades también se obtiene la amplitud de la señal que emite el sensor, la temperatura del agua que registra cada uno de ellos, la posición en z respecto al suelo de la piscina, la correlación de la señal y la relación de ruido de la misma señal, datos que permiten corroborar el buen funcionamiento de cada ADV.

Entre estos datos se encuentra la frecuencia de muestreo, que en este caso son 100 Hz, que significa que cada segundo se obtienen 100 velocidades por ADV. Es decir que si este experimento dura como mínimo 1 hora, se obtendrán como mínimo 360000 datos de velocidad en cada posición.

El volumen de datos a estudiar es considerable ya que son muchos datos por posición y muchas posiciones por experimento. Por lo tanto estos datos tienen que ser tratados para poder coger valores más significativos para que el estudio sea posible.

Debido a que antes de empezar a almacenar los datos se esperan 30 minutos, se considera que el flujo en la piscina ya ha adquirido características de fenómeno estacionario, con las celdas convectivas generadas debido a la existencia de las paredes.

Este volumen de datos ha sido clasificado de la diferente manera:

- Nombre del experimento: Stationary300, Stationary350 y Statyonyary400.
- Distancia en perpendicular al jet (componente X): 2.5 Dp, 5 Dp, 7.5 Dp, etc.
- Distancia lateral respecto del eje de simetría de las hélices (componente Y): pos15.5, neg-30.0 etc.
- Altura respecto del fondo: Z1, Z12, Z2 y Z3.

Un archivo sería por ejemplo: Stationary350_x_5Dp_y_neg_-61.0_z12.vel

6.5- Tratamiento de los datos mediante MATLAB

Antes de empezar a tratar los datos desde nuestro ordenador, el mismo programa con el que trabajan los sensores de velocidad (ADV's) transforman sus archivos de almacenaje, con extensión vel, en archivos legibles (uno para cada variable de lectura: velocidad, correlación, amplitud, etc, en formato txt).

Se usará el programa MATLAB porque permite hacer todo el desarrollo, desde la entrada de los datos ya transformados hasta los resultados listos para analizar.

En primer lugar lo que se ha hecho es buscar al archivo de velocidad más pequeño de cada experimento y cortar los demás hasta ese tamaño para tener todos los vectores de velocidad de igual longitud. Una vez se tienen del mismo tamaño se procede a hacer la media de todas las velocidades para cada punto del experimento.

De este modo se tiene todo ese gran volumen de datos de antes resumido en un archivo menor y de más fácil manejo.

De este archivo final lo importante es clasificarlo de modo que se puedan agrupar las velocidades medias por secciones para poder así representarlas gráficamente. Para eso se necesita buscar entre todas las velocidades medias de cada experimento (300, 350 o 400 rpm), las que están a la misma distancia perpendicular al jet de las hélices, y colocarlas en una matriz de forma que representen ordenadamente su posición en el espacio en forma de malla de puntos. Esta matriz representa una cuadrícula de puntos con diferentes valor que se expresará gráficamente con curvas de igual velocidad (que son las curvas de nivel de un mapa, pero en vez de alturas velocidades).

7- Resultados

7.1- Velocidades

Antes de comentar las gráficas obtenidas de los ensayos en la piscina, se calculan las velocidades que proponen los autores con sus fórmulas.

Las características de la hélice son las mismas para todas las fórmulas y son las siguientes:

$$D_p \text{ (diámetro de la hélice)} = 0.254 \text{ metros}$$

$$D_h \text{ (diámetro eje hélice)} = 0.0635 \text{ metros}$$

$$D_o \text{ (diámetro del chorro de agua)} = 0.1803 \text{ metros}$$

$$C_t \text{ (coeficiente de empuje)} = 0.5$$

$$p' \text{ (brea de la hélice)} = 0.94$$

$$\beta \text{ (ratio área de la pala)} = 0.5$$

$$H_h \text{ (altura del eje de la hélice respecto del fondo)} = 0.26 \text{ metros}$$

$$C_1 \text{ (factor confinamiento fondo)} = 0.4$$

$$C_2 \text{ (factor confinamiento obra)} = 1.1$$

Los resultados se dividen en dos grupos, un grupo donde están la mayoría de las fórmulas que derivan de la teoría de momentum y las otras obtenidas del caudal volumétrico que desplazan las hélices. Estas fórmulas están presentadas en el apartado 3.4 Fundamentos teóricos.

A continuación se presenta su resultado por autor, en función de las revoluciones por minuto en las que giran los motores. En el primer grupo se obtienen resultados más o menos parecidos a pesar de que la fórmula de Romisch da valores un poco superiores, esto es debido a que la unidad de velocidad de cm/s es muy pequeña por lo que pequeñas variaciones pueden quedarse reflejadas. En estudios¹ anteriormente realizados ya se observaron estas variaciones.

Para el segundo grupo de fórmulas los resultados son muy parecidos entre sí pero su valor es considerablemente mayor al obtenido con las formulas derivadas del momentum.

1- Wei-Haur Lam, Gerard Hamill, Desmond Robinson, Srinivasan Raghunathan and Yongchen Song. *Analysis of the 3D Zone of Flow Establishment from a Ship's Propeller*. KSCE Journal of Civil Engineering (2012) 16(4):465-477

Tabla 1. Velocidades según autores cm/s			
Autores \ Rpm	300	350	400
Romisch (1977)	50.48	58.90	67.31
Hamill (1987)	42.23	49.27	56.30
Stewart (1992)	40.63	47.40	54.17
Hashmi (1993)	40.35	47.02	53.81
Pianc and EAU (2004)	75.97	79.98	83.62
ROM (2011)	75.47	79.45	83.07
EAU (2004) Fondo	32.42	32.81	34.15
ROM (2011) Fondo	23.95	24.24	25.24

Estas fórmulas definen las velocidades en la zona de establecimiento del flujo (ver imagen 4), a una distancia entre 2 y 3 veces el diámetro de la hélice, excepto las de la ROM (2011) y Pianc (1997) donde sus fórmulas corresponde a una distancia de $1/2$ veces el diámetro de las hélices.

También comentar que estas fórmulas están definidas para una sola hélice a diferencia de este trabajo final de grado que se realiza con dos.

Las dos últimas filas indican la velocidad del fluido en el fondo de la piscina, donde se observa que los valores calculados son mucho más pequeños que en la zona cercana a las hélices.

7.2- Escenario1: 400 rpm

De los resultados se obtienen velocidades en las tres componentes que proporciona los ADV's, pero según la ROM las velocidades radiales y tangenciales (velocidades en el eje Z y Y) se pueden considerar despreciables en comparación con las velocidades axiales.

Como ya se he comentado anteriormente, los resultados que se obtienen representan el campo de velocidades axiales en diferentes secciones de la piscina. A continuación se comentarán y se compararán con las velocidades obtenidas a partir de las fórmulas propuestas por diferentes autores.

En primer lugar se analizarán las gráficas obtenidas cuando los motores giraban a 400 rpm comentando las secciones más interesantes, ya que la gráficas obtenidas a menores velocidades se comportan de igual manera, pero con valores distintos.

- Secciones perpendiculares al eje X (vistas frontales de las hélices):

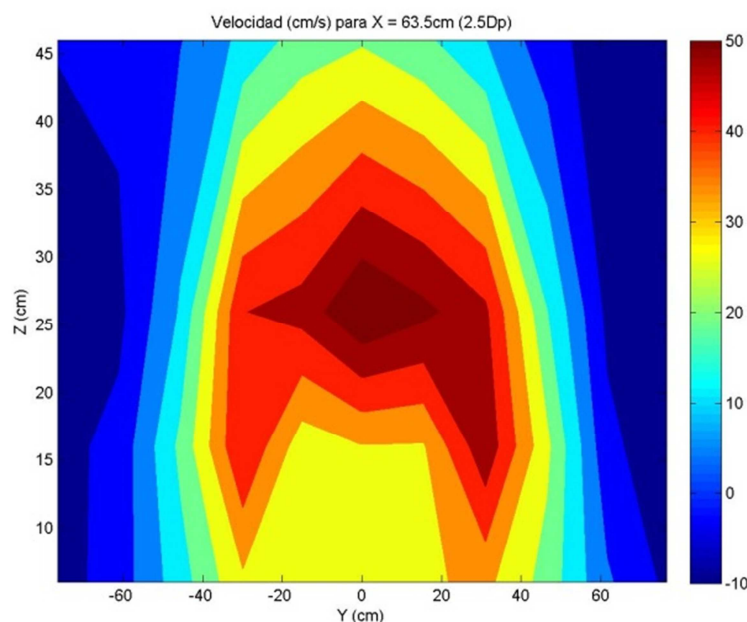


Figura 11 Velocidades en el plano X = 2.5Dp

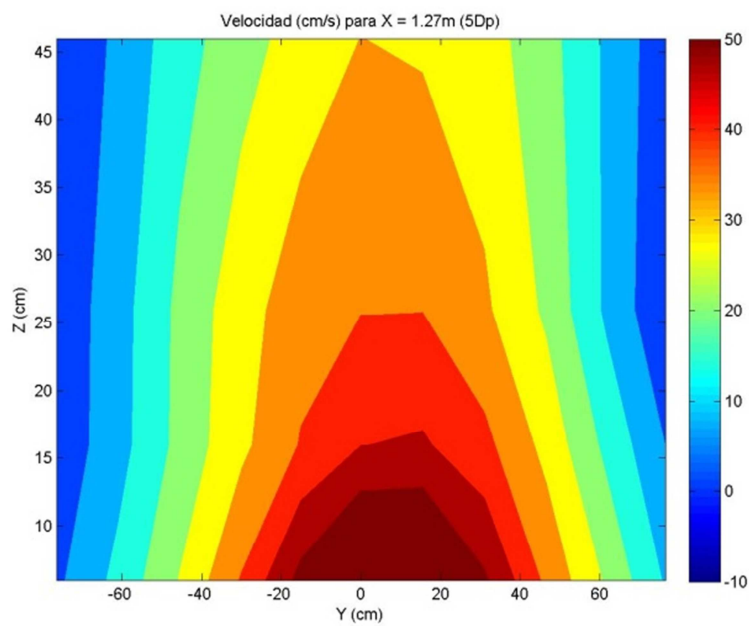


Figura 12 Velocidades en el plano $X = 5Dp$

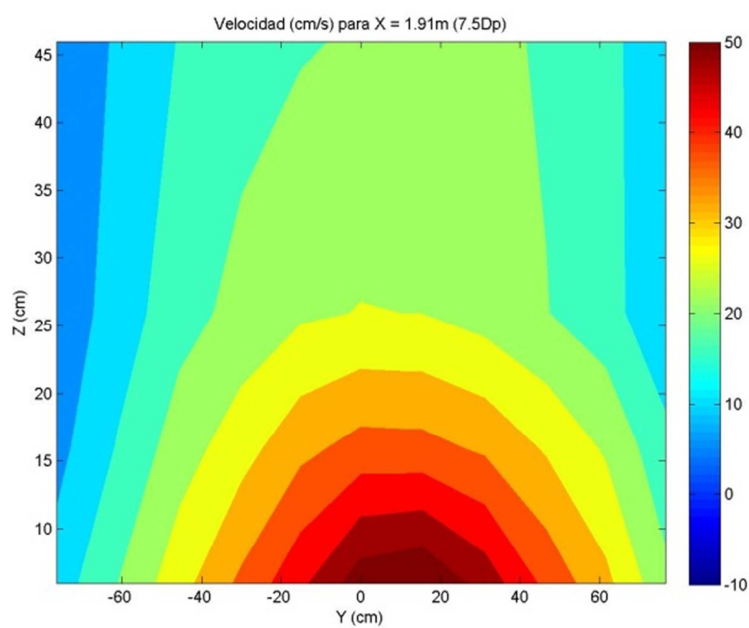


Figura 13 Velocidades en el plano $X = 7.5Dp$

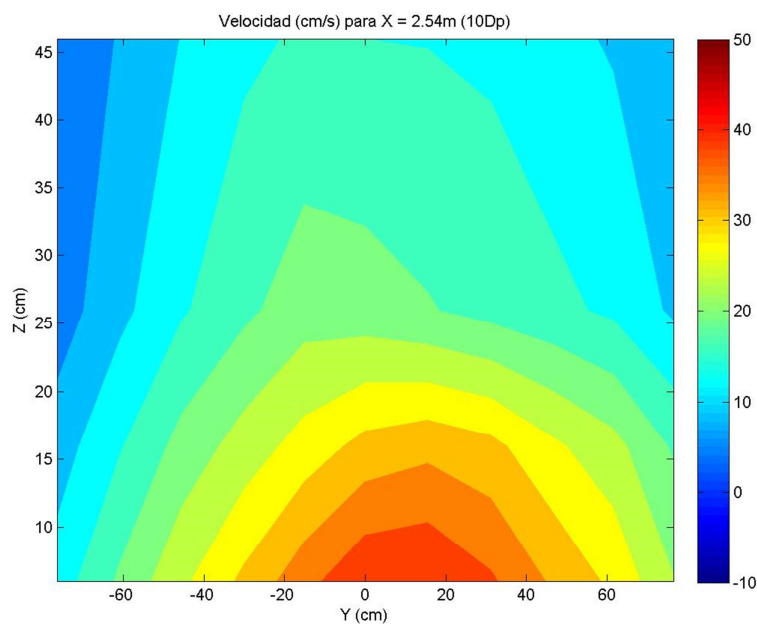


Figura 14 Velocidades en el plano $X = 10Dp$

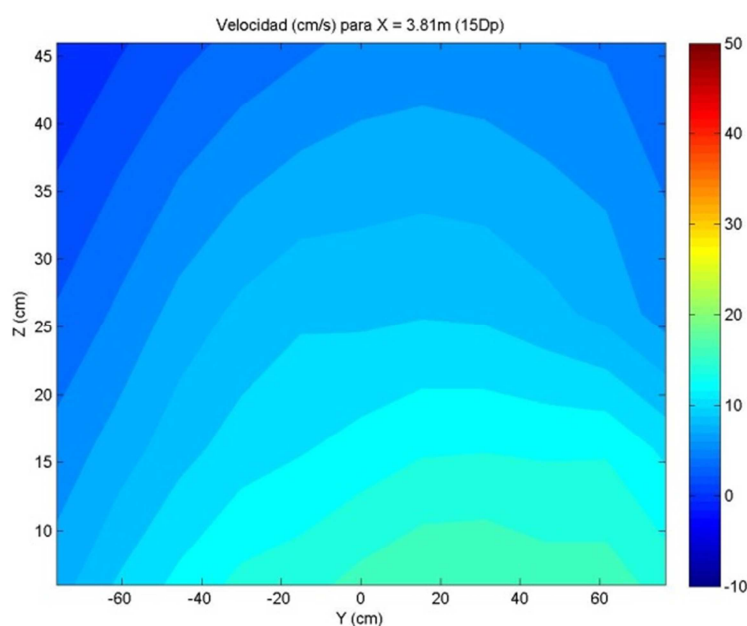


Figura 15 Velocidades en el plano $X = 15Dp$

Se puede observar a primera vista que en el centro de la figura 11, eje de simetría entre los dos motores, se localizan las velocidades máximas.

Que las velocidades tiendan a ser mayores hacia el lado derecho se debe quizás a que el motor derecho gire a más revoluciones por minuto que el izquierdo. No se puede comprobar cuál de los dos es el que gira correctamente a las revoluciones establecidas,

ya que dependiendo de las fórmulas de los autores se corresponden a una o a la otra. Esta diferencia de revoluciones tampoco es realmente significativa, ya que las máximas se encuentran entre las dos hélices, aunque la dirección promedio que éstas toman no es paralela a los ejes de las hélices.

Si se mira la progresión de las velocidades a lo largo de las figuras 11 a 15, se observa que este chorro central se dirige hacia el fondo de la piscina, es decir, que las velocidades máximas impactan con el fondo de la piscina y se van desvaneciendo a lo largo de ella. A una distancia de 7,5 veces el diámetro de la hélice, todavía se encuentran velocidades tan elevadas como las que se observaban en la zona de estabilización del flujo, pero a partir de allí estas ya van descendiendo de forma gradual.

También se puede comentar que en gran parte de las figuras 11 a 15 se observan velocidades negativas debido a que el flujo en los extremos va en dirección contraria. Esto sucede ya que en la piscina se acaba generando un flujo estacionario y el agua circula hacia delante por la zona central y, hacia atrás, por sus laterales para compensar el volumen desplazado centralmente.

- Secciones perpendiculares al eje Z (vista en planta):

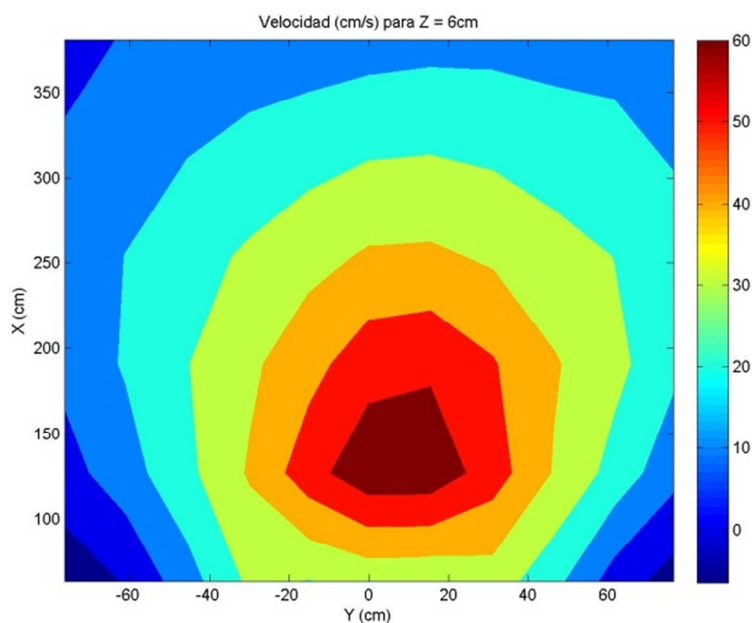


Figura 16 Velocidades en el plano Z = 6 cm

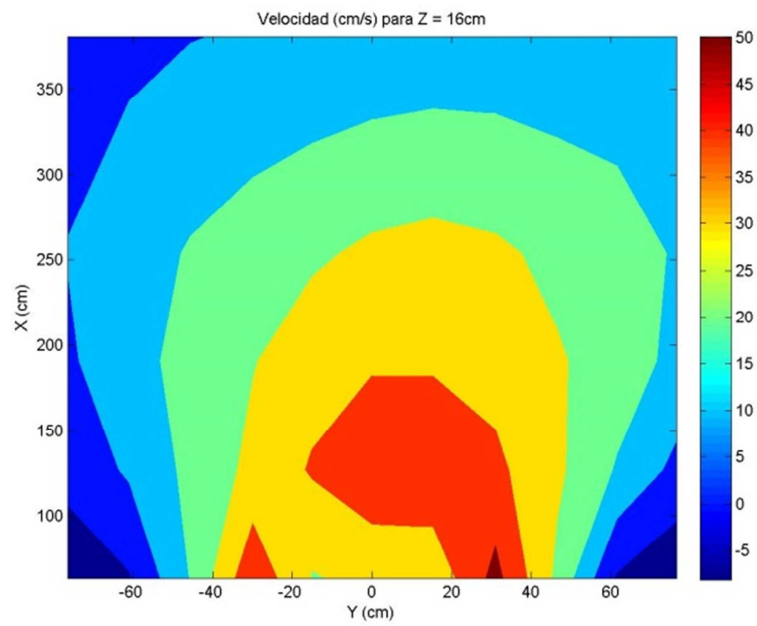


Figura 17 Velocidades en el plano $Z = 16\text{ cm}$

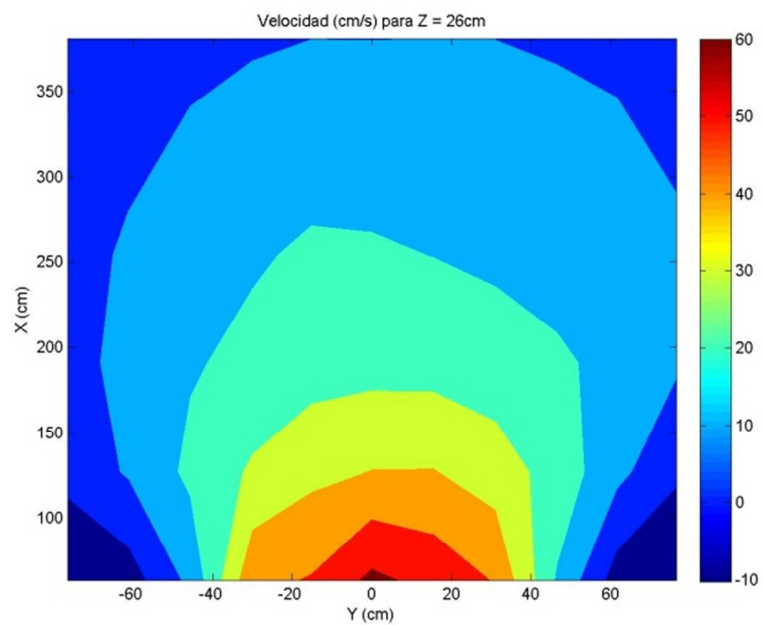


Figura 18 Velocidades en el plano $Z = 26\text{ cm}$

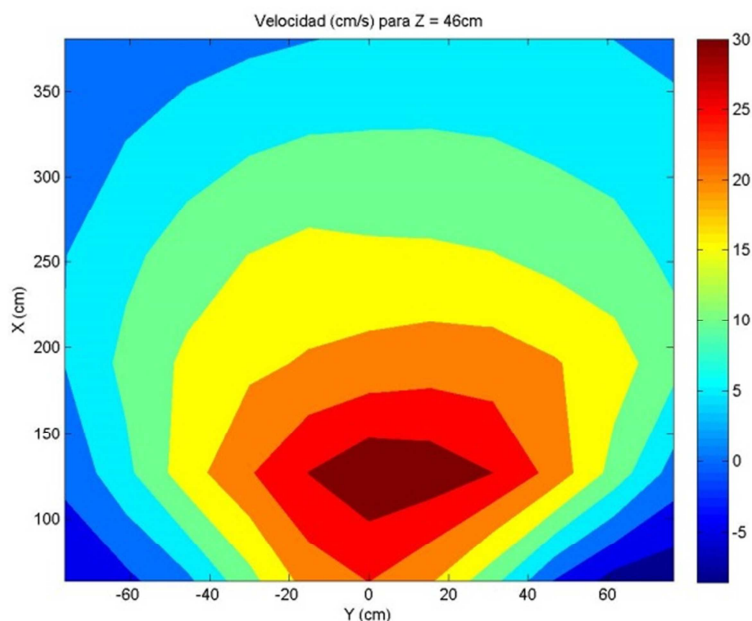


Figura 19 Velocidades en el plano $Z = 46 \text{ cm}$

Estas gráficas muestran las velocidades en función de la profundidad. Se puede observar que las velocidades máximas se encuentran a una altura sobre el fondo de la piscina de 26 centímetros, que es una altura cercana a la altura de las hélices. Y sobre todo a una altura de 6 cm, es decir en el fondo de la piscina, donde las velocidades aumentan debido al impacto contra el suelo.

Las velocidades en la superficie, aunque el color sea el mismo en la leyenda, se puede leer que son del orden de la mitad que las que se han medido en el fondo, como ya se había observado en las gráficas anteriores el chorro tiende a ir hacia el fondo y son debidas a las oscilaciones de la lámina libre.

Estas graficas son muy explicitas, especialmente la figura 16, ya que para estudiar temas de erosión, muestra rápidamente la zona que posiblemente se vea afectada y de qué orden de afectación se trata según las velocidades que se observen. La máxima velocidad obtenida, en torno a 60 cm/s, sería equivalente a una velocidad de 300 cm/s a escala de prototipo (es decir, 10,8 km/h).

También, como en el caso anterior, se detectan velocidades negativas, ya que el flujo de la piscina es estacionario tanto en flujo horizontal como en vertical.

Comentar que en algunas figuras el máximo de la escala de colores es distinta ya que sus máximos varían, esto permite apreciar mejor las variaciones de velocidad ya que si se estudia con la otra escala no quedan tan bien representadas. Sin embargo, al hacerlo todo con la misma escala de leyenda, es más fácil diferenciar zonas más afectadas, equivalentes a zonas rojas, es decir, a velocidades elevadas (60cm/s).

- Secciones perpendiculares al eje Y (vistas laterales):

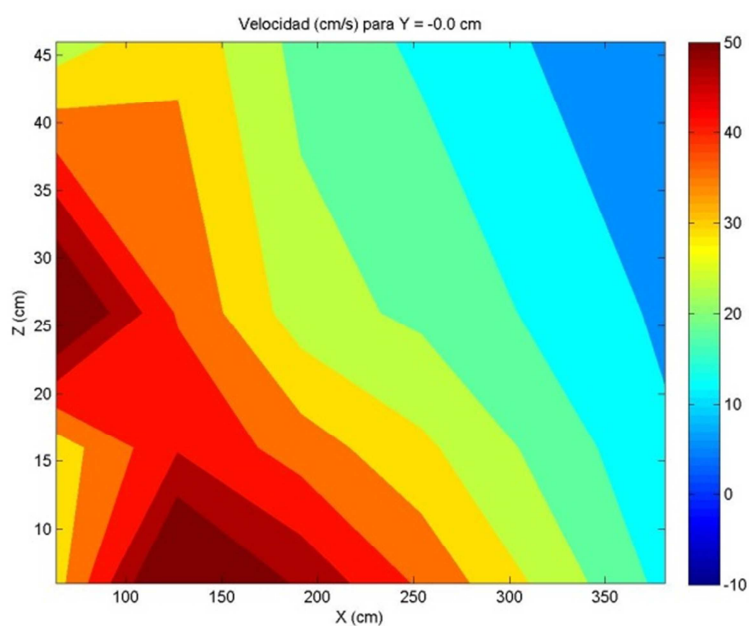


Figura 20 Velocidades en el plano $Y = -0.0$ cm

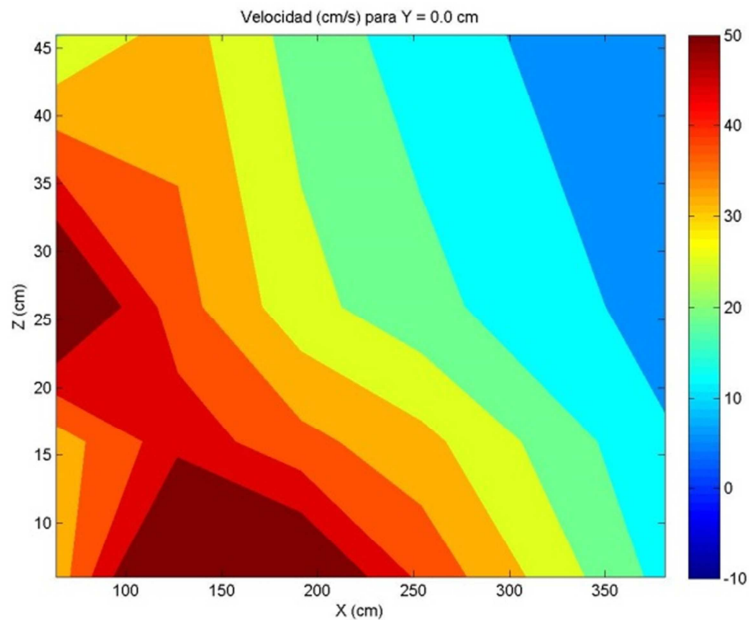


Figura 21 Velocidades en el plano $Y = 0.0$ cm

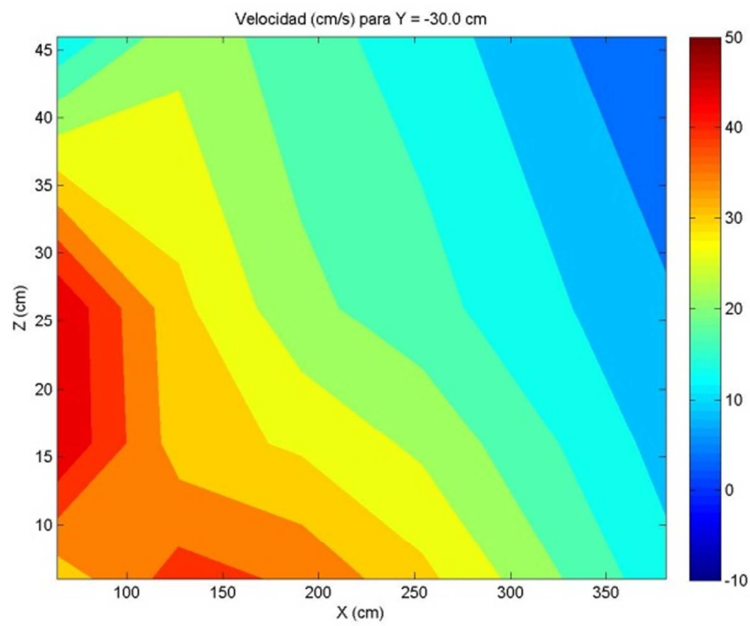


Figura 22 Velocidades en el plano $Y = -30.0$ cm

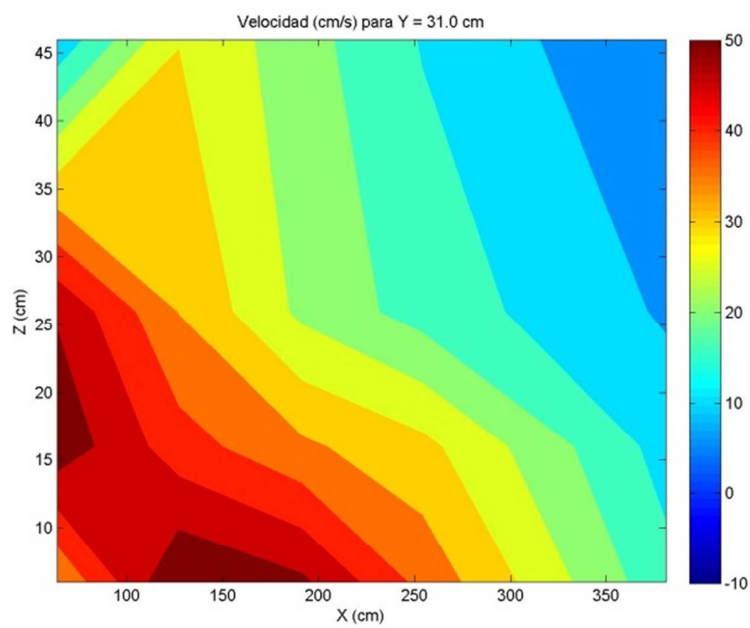


Figura 23 Velocidades en el plano $Y = 31.0$ cm

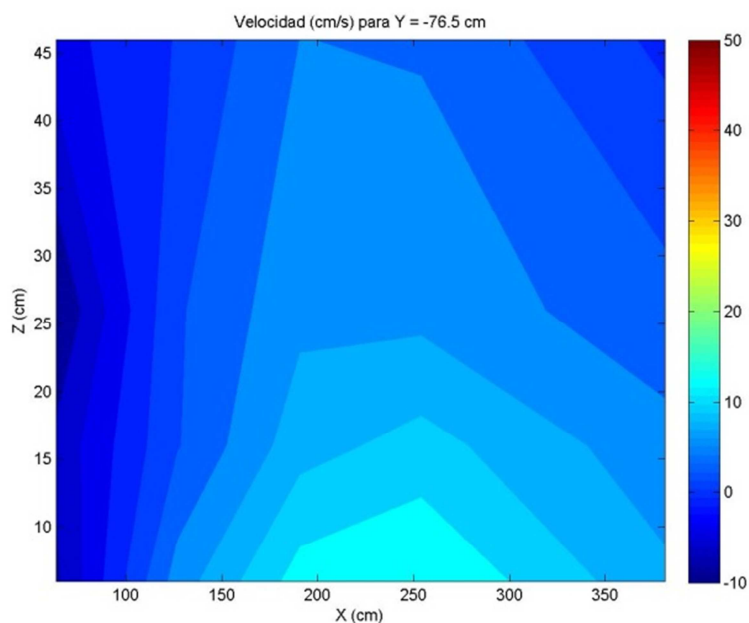


Figura 24 Velocidades en el plano $Y = -76.5$ cm

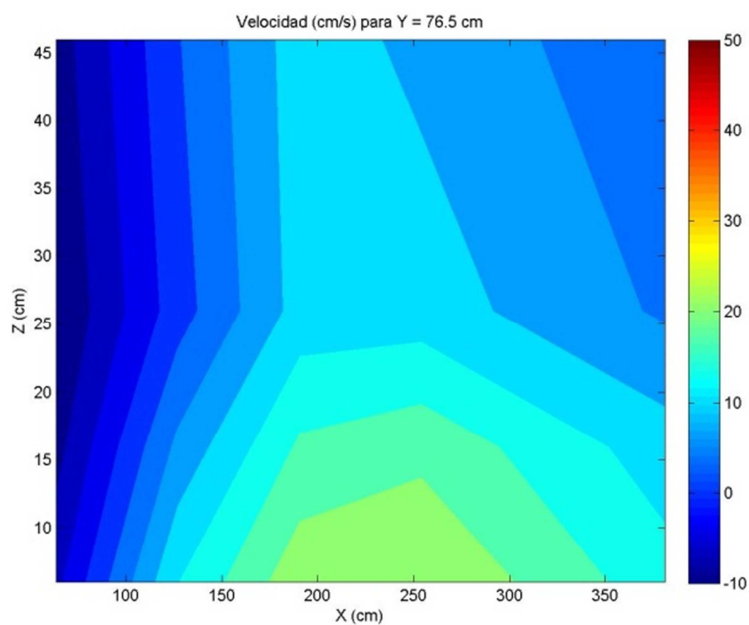


Figura 25 Velocidades en el plano $Y = 76.5$ cm

Estas gráficas corresponden a cortes paralelos a la dirección del chorro que generan las hélices y verticales. Estos tres grupos de parejas corresponden a cortes simétricos respecto del eje de simetría entre las dos hélices.

Las figuras 20 y 21 corresponden a las posiciones 0.0 centímetros, esto sucede ya que cuando se desplazaban los sensores sobre este eje se hacía coincidir el sensor del centro para de esta forma verificar los resultados y se medía dos veces en el mismo punto, pero durante dos ensayos distintos. Como se observa, las figuras correspondientes son casi idénticas, por las tanto, se puede confirmar que los datos están bien obtenidos. También se observa en las figuras los mismos resultados que en los dos casos anteriores (planos X y planos Z) pero de forma más explícita, que el chorro de velocidades máximas desciende de la altura de las hélices hasta el fondo a una distancia de 6 veces el diámetro de las hélices, y que sus máximos se encuentran al principio cuando el agua es impulsada por las hélices y cuando esta choca contra el fondo. Si se comparan con la figura 5 (ROM, 2011), no se observa la misma simetría especular respecto al eje de las hélices.

Las figuras 24y 25, que están a 76.5 centímetros del eje de simetría, son gráficas que también se parecen mucho entre ellas y donde se observa que en los laterales la velocidades son muy inferiores a las del centro del chorro. También en las proximidades de las hélices, las velocidades son negativas ya que la corriente que generan éstas en su parte interior arrastra el agua de los laterales hacia el centro.

Finalmente otro grupo de figuras en posiciones simétricas interesantes a estudiar son las que se encuentran en los planos $Y = -30$ e $Y = 31$ centímetros, ya que en estas gráficas se muestra que las velocidades máximas son mayores en la simetría derecha que en la de la izquierda, a pesar de que tienen la misma forma. Esto se debe a que, tal como se comentó anteriormente, el motor derecho gira a unas pocas revoluciones más que el izquierdo.

7.3- Escenario 2: 350 rpm

Después de analizar este primer experimento a 400 revoluciones por minuto se pasa a analizar el segundo, en este caso el de 350 rpm. En general los resultados gráficos son muy parecidos, con la única diferencia que las velocidades máximas son menores debido al menor número de vueltas que realizan los motores y, por tanto, a una menor velocidad de salida frente a las hélices.

A continuación se puede observar las figuras más características de este experimento y compararlas con el experimento anterior.

Se presentan en parejas de gráficas donde se puede observar su similitud.

- Secciones perpendiculares al eje X (vistas frontales de las hélices, arriba 350 rpm, abajo 400 rpm):

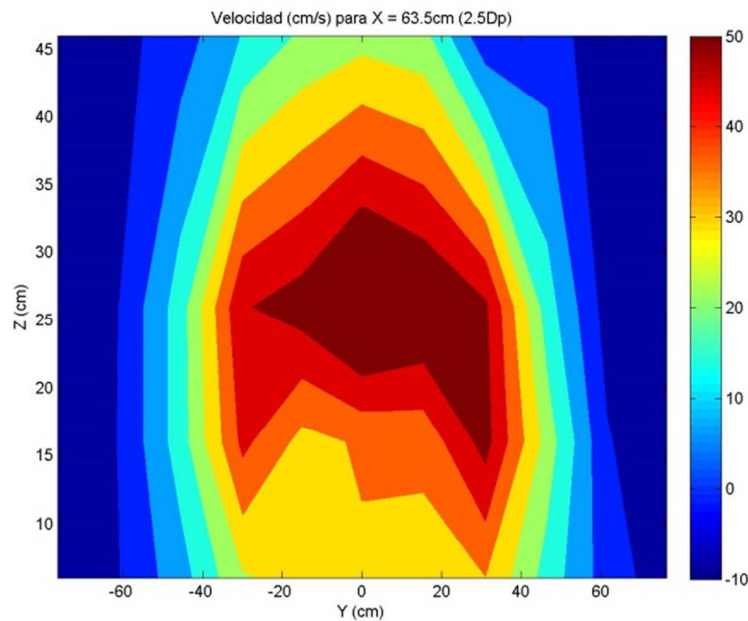


Figura 26 Velocidades en el plano $X = 2.5Dp$ (350rpm)

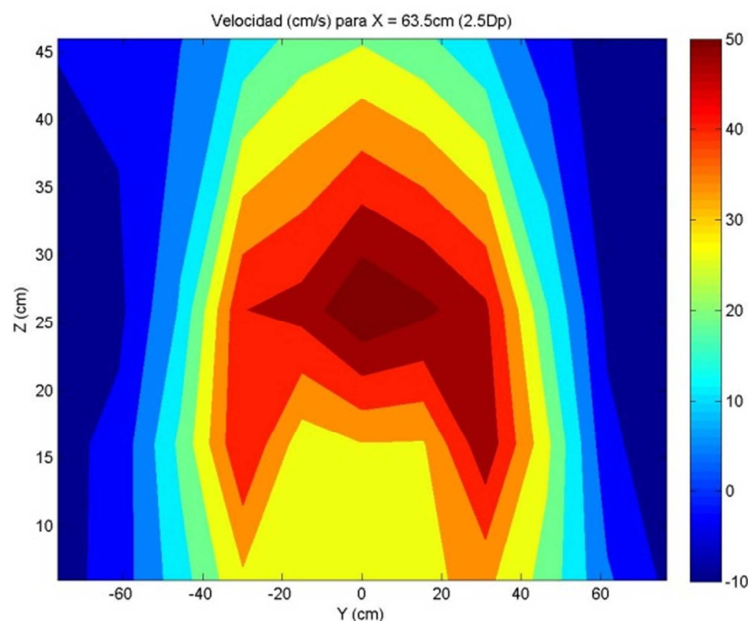


Figura 27 Velocidades en el plano $X = 2.5Dp$ (400rpm)

A primera vista en estas gráficas comparativas se observa que a 350 rpm el pico de velocidad máxima es más amplio que el de 400 revoluciones, como el flujo todavía no es estacionario estas velocidades son muy parecidas, por lo tanto la diferencia a esta distancia de las palas es muy pequeña o incluso se puede considerar que se comportan igual.

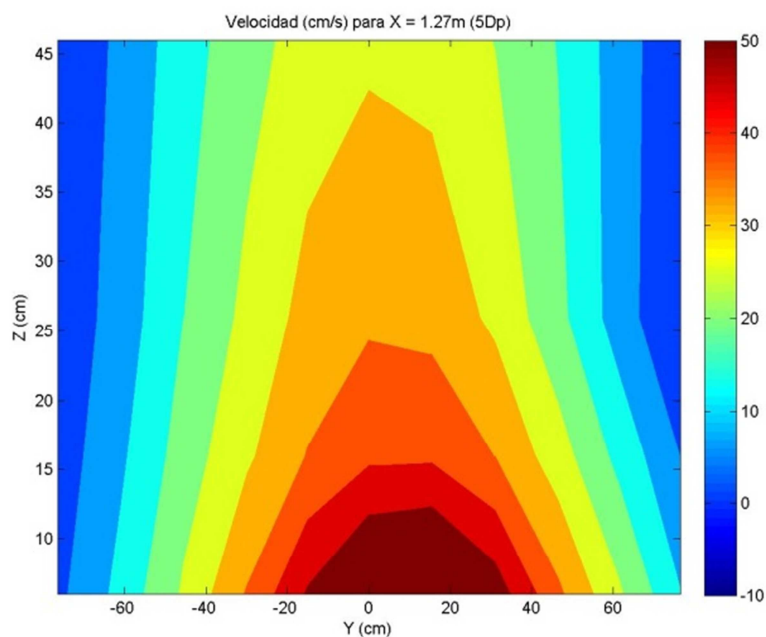


Figura 28 Velocidades en el plano $X = 5Dp$ (350rpm)

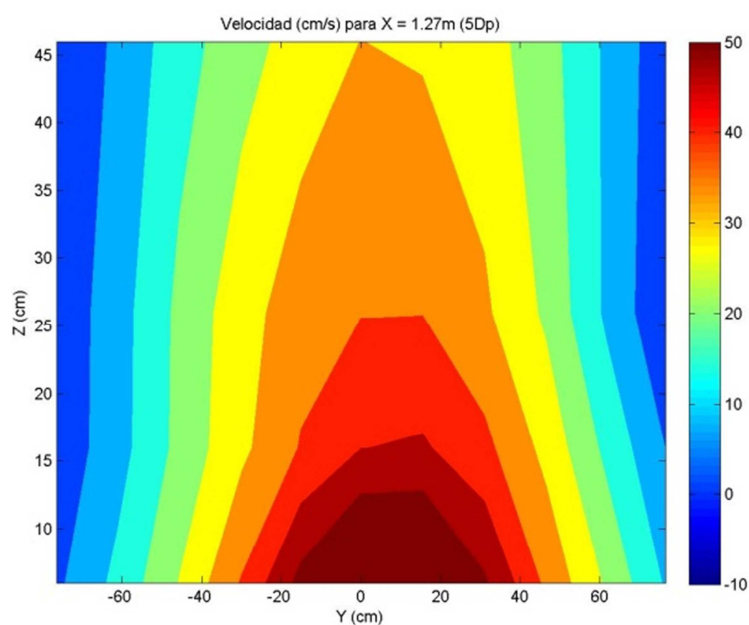


Figura 29 Velocidades en el plano $X = 5Dp$ (400rpm)

En las gráficas inferiores se muestra que una vez estas velocidades tocan el fondo de la piscina se comportan de idéntica manera en cuanto a distribución de velocidades pero con estas más elevadas en el caso de 400 rpm como es lógico y se ha dicho anteriormente.

Cuando se observan secciones perpendiculares al eje Y se obtienen resultados también muy parecidos, y como en el caso interior, solo varían las velocidades máximas y el área dentro de la gráfica que estas ocupan como se puede observar en las siguientes gráficas.

- Secciones perpendiculares al eje Y (vistas laterales, arriba 350 rpm, abajo 400 rpm):

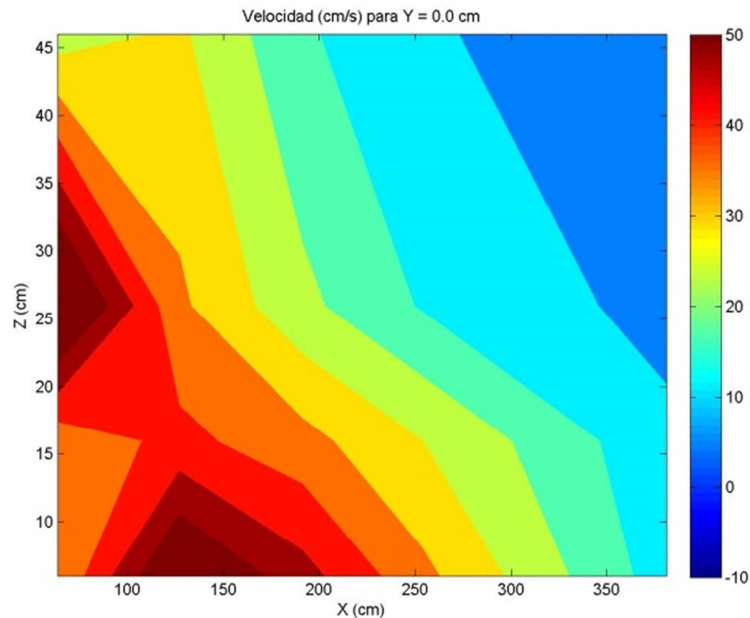


Figura 30 Velocidades en el plano $Y = 0.0$ cm (350rpm)

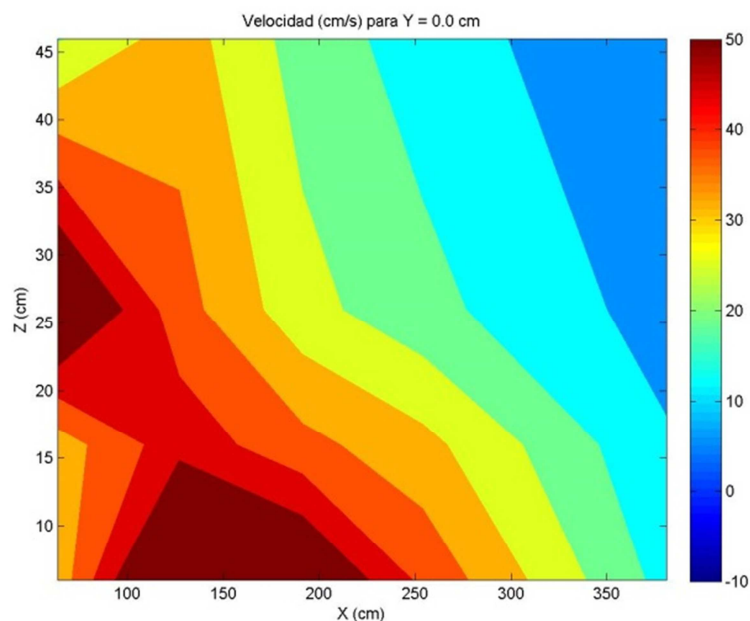


Figura 31 Velocidades en el plano $Y = 0.0$ cm (400rpm)

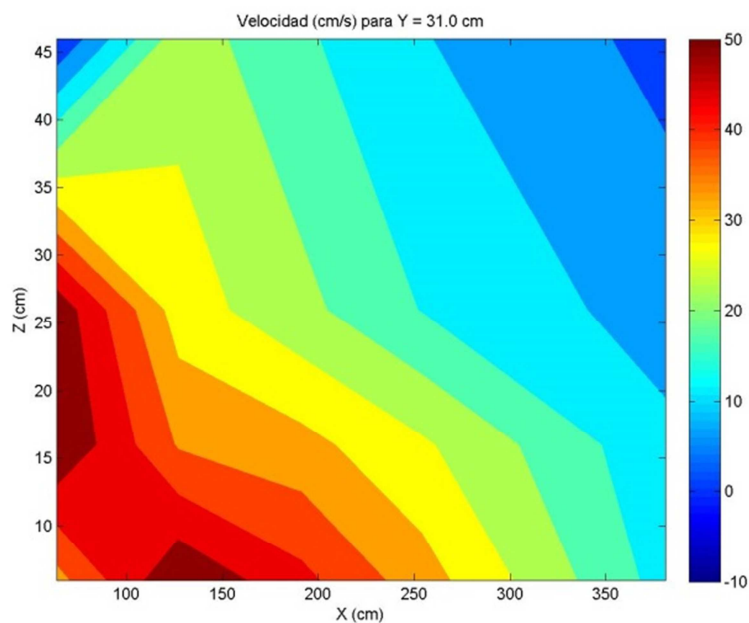


Figura 32 Velocidades en el plano $Y = 31.0$ cm (350rpm)

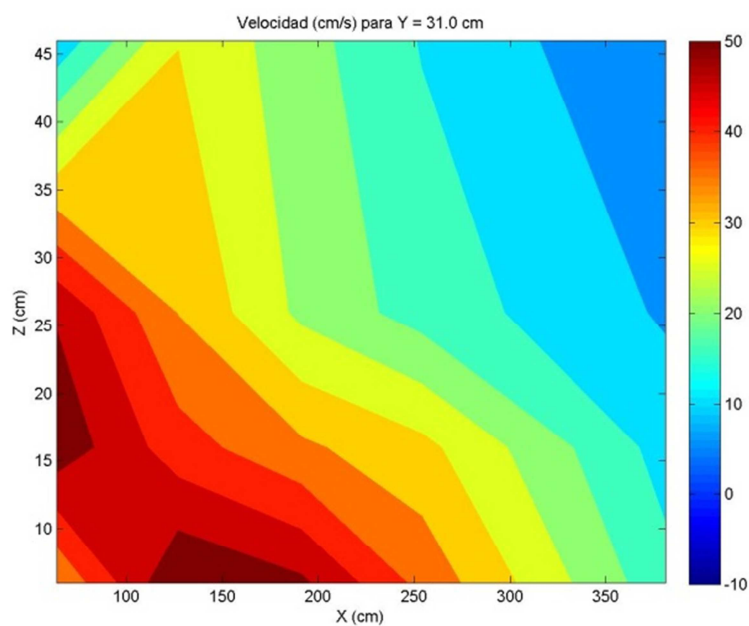


Figura 33 Velocidades en el plano $Y = 31.0$ cm (400rpm)

Como en el caso anterior estas son muy parecidas, ya que una variación de 50 rpm no es tan significativa como para que sus máximos disten tanto.

Finalmente cuando se analizan velocidades en secciones a diferentes alturas, estas sí que tienen una mayor diferencia que en las gráficas anteriores, especialmente en las secciones más cercanas al fondo donde las velocidades presentan máximos menores y donde se muestra menor afectación sobre el fondo.

- Secciones perpendiculares al eje Z (vista en planta, arriba 350 rpm, abajo 400 rpm):

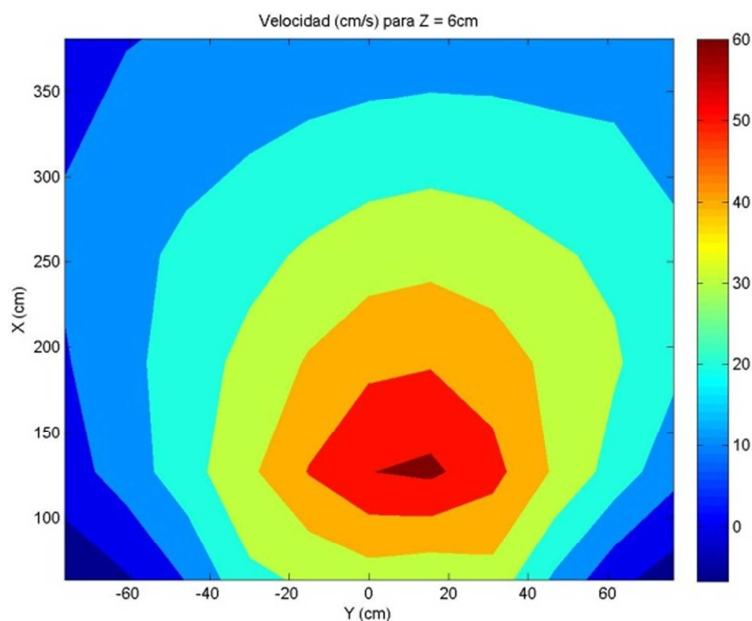


Figura 34 Velocidades en el plano Z = 6 cm (350rpm)

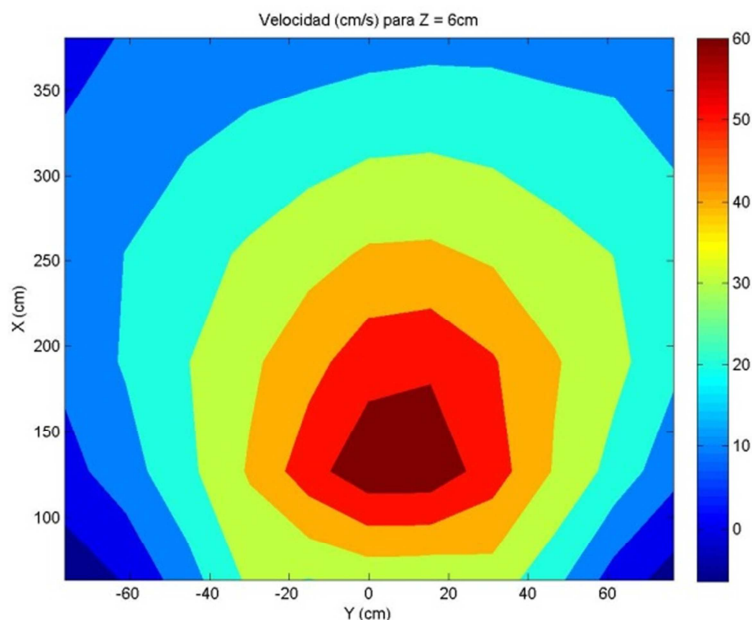


Figura 35 Velocidades en el plano Z = 6 cm (400rpm)

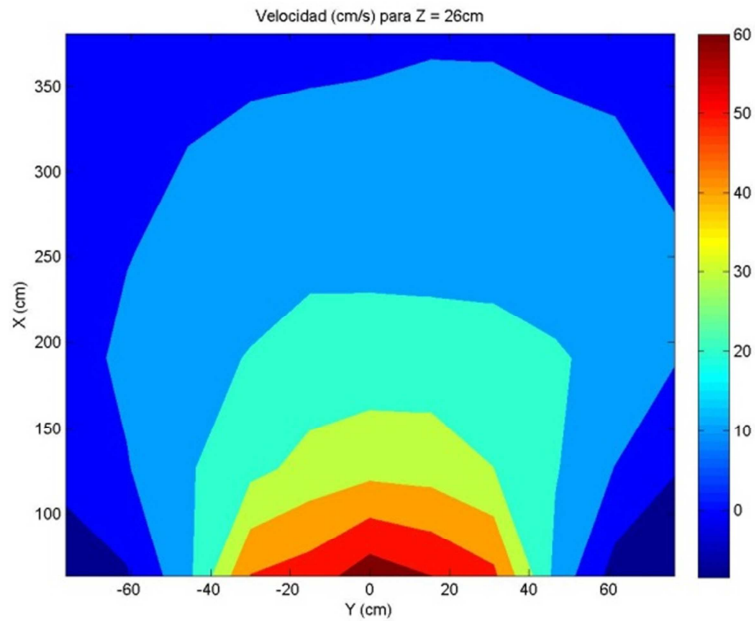


Figura 36 Velocidades en el plano $Z = 26$ cm (350rpm)

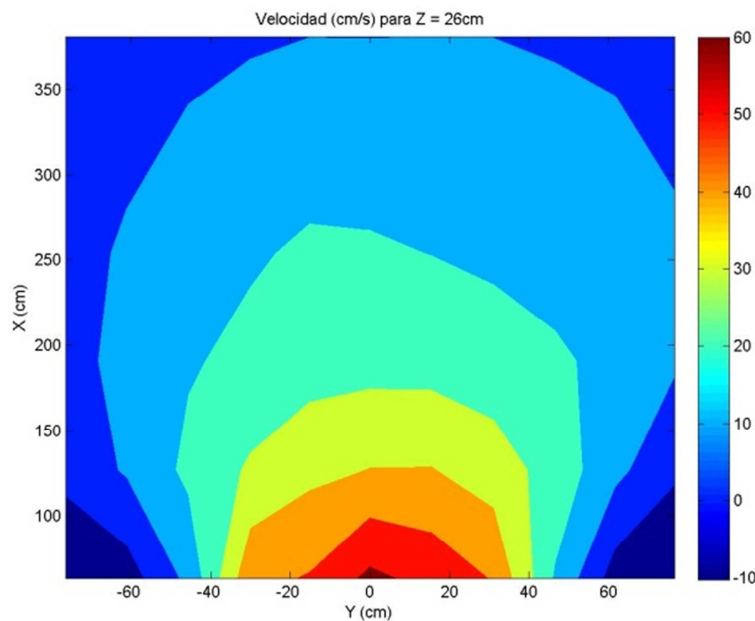


Figura 37 Velocidades en el plano $Z = 26$ cm (400rpm)

En las gráficas superiores se puede apreciar mucho mejor que en las gráficas comparativas anteriores, el área de afectación de las velocidades máximas es menor en el caso de 350 rpm, como ya es lógico, ya que el fondo se verá más afectado por velocidades mayores cuanto mayor sean las revoluciones de las hélices.

En cambio a una altura cercana a la de los ejes de las hélices, las variación no es tan significativa, más bien se parecen. Esto corrobora las gráficas anteriores donde se aprecia que cerca de las hélices el flujo todavía no se ha estabilizado y por tanto no alcanza sus máximos.

7.4- Escenario 3: 300 rpm

En el caso del experimento a 300 revoluciones por minuto, se ha detectado un error en el registro de datos durante uno de los experimentos. La forma de las gráficas es parecida a los dos casos anteriores, pero con la pequeña diferencia de que en este caso hay un punto que da unas velocidades muy cercanas a 0. Este suceso no es normal ya que este punto se encuentra en una posición central de la sección estudiada y por lo tanto tendría que ser distinta de cero.

- Secciones perpendiculares al eje X (vistas frontales de las hélices) y Z (vista en planta):

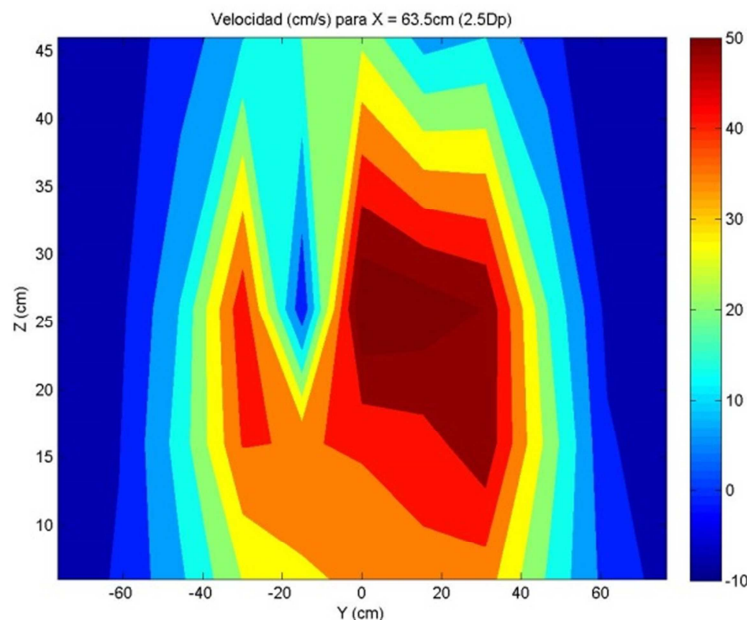


Figura 38 Velocidades en el plano X = 2.5Dp (300 rpm)

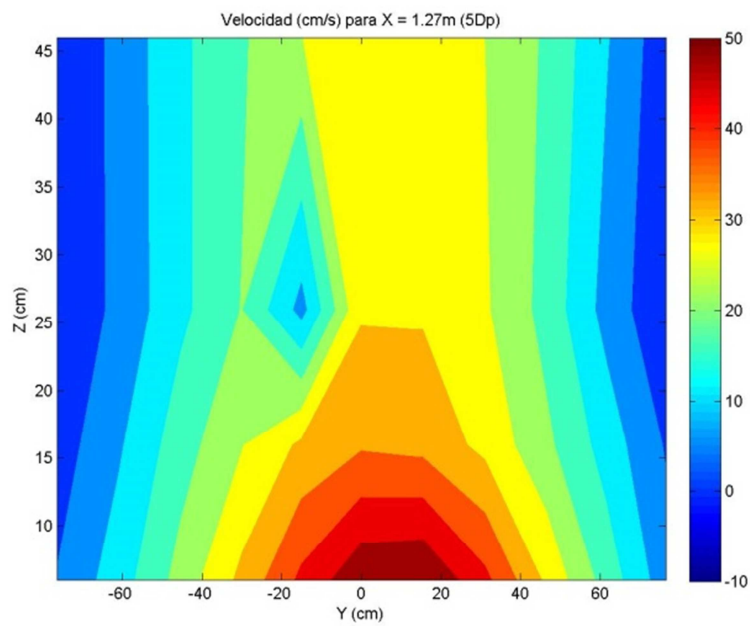


Figura 39 Velocidades en el plano $X = 5Dp$ (300rpm)

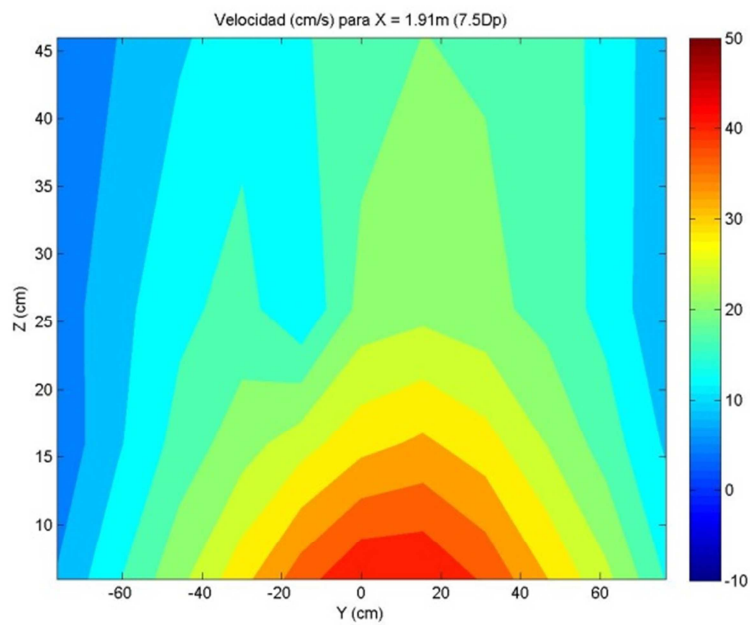


Figura 40 Velocidades en el plano $X = 7.5Dp$ (300 rpm)

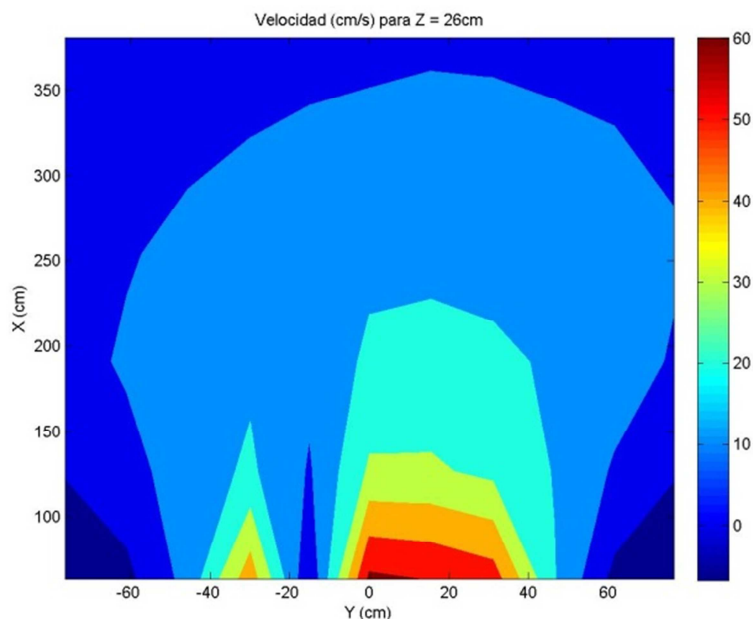


Figura 41 Velocidades en el plano $Z = 26$ cm(300 rpm)

Este error se observa a primera vista en las figuras 28 a 31, y si se analizan los valores usados para generar ese valor medio y la metodología utilizada para obtenerlo, todo indica que existía un problema con el sensor que medía la velocidad en ese punto, ya que esos valores eran cercanos a cero o negativos.

Se puede hacer esta afirmación ya que en primer lugar es una serie seguida de experimentos, es decir que en un mismo día de experimentos el error con el sensor de medida se ha repetido en los diferentes ensayos consecutivos.

Esta primera observación hace que se busque en los archivos de configuración para el registro de velocidades durante esos experimentos, en concreto, en los cuales salen las características del sensor que daba esas velocidades erróneas. A diferencia de los demás sensores que tienen la mayoría de características idénticas, en este hay una variación. Ésta diferencia está en el rango de velocidades configurado, que en lugar de que este valor sea de 250 cm/s es de 30 cm/s. Este valor es una estimación de la velocidad que los sensores van a encontrarse en el experimento. Dado que los valores de velocidad eran en realidad mucho mayores a 30 cm/s, se registraron valores erróneos. Esto pudo suceder ya que al encender y apagar el programa diariamente, en ocasiones se cambian los parámetros de los sensores.

Las demás secciones estudiadas en los experimentos anteriores son similares, con la diferencia del único punto erróneo que se ha comentado unas líneas más arriba. En el anexo A se muestran todas las gráficas referentes a éste y los otros dos experimentos.

7.5- Comparación resultados experimentales – propuestas teóricas

De todas las gráficas anteriores se tomará como velocidad medida una media de las velocidades que se encuentran entre los dos ejes de las hélices y a su misma altura. De este modo se tendrá en cuenta tanto la velocidad frente a las hélices como la que está entre ellas. Estas velocidades son las siguientes:

$$350 \text{ rpm } V_o = 53.72 \text{ cm/s}$$

$$400 \text{ rpm } V_o = 56.44 \text{ cm/s}$$

No se calcula la velocidad para 300 rpm ya que al observar un error en las gráficas anteriores se descarta el experimento, pues cabría esperar que su solución se asemejaría mucho a los escenarios de 350 y 400 rpm.

Finalmente la tabla comparativa de velocidades queda de la siguiente manera:

Tabla 2. Velocidades según autores y medidas en cm/s		
Autores \ Rpm	350	400
Romisch (1977)	58.90	67.31
Hamill (1987)	49.27	56.30
Stewart (1992)	47.40	54.17
Hashmi (1993)	47.02	53.81
Pianc and EAU (2004)	79.98	83.62
ROM (2011)	79.45	83.07
Experimento	53.72	56.44

Las velocidades obtenidas en los experimentos se asemejan bastante con la de los primeros autores, hasta el punto de encontrarse en valores intermedio de estos, pero quedan muy lejos de las últimas fórmulas propuestas, mucho más conservadoras.

Un dato curioso es también que en los experimentos la diferencia entre los máximos no es tan amplia como en el caso de las fórmulas, esto puede ser debido a la falta de más experimentos para sacar conclusiones más sólidas, o que en la realidad la variación de revoluciones no es significativa para el tamaño de hélice que se está usando.

7.6- Velocidades de fondo

Por lo que respecta a las velocidades en el fondo, se comprobará si las velocidades que se obtienen con las fórmulas que nos facilitan la ROM y la EAU se corresponden a las obtenidas en el escenario 1 (400 rpm).

En primer lugar, para poder estudiar la velocidad máxima en el fondo, se ha decidido representar las variaciones de las velocidades en las secciones perpendiculares al eje Z más cercanas del fondo, de esta manera conocer cuáles son las velocidades máximas y a qué distancia de las hélices se encuentran.

Como se puede observar en los apartados anteriores la afectación de estas velocidades en el fondo es una superficie pequeña centrada en la piscina, por lo tanto se representaran las velocidades obtenidas en los sensores centrales y de los experimentos con las revoluciones mayores.

Gráficas de altura $Z = 6$ centímetros y $Z = 26$ centímetros del fondo, sensores centrados y revoluciones de las hélices a 400 rpm:

- Secciones perpendiculares al eje Z (vista en planta):

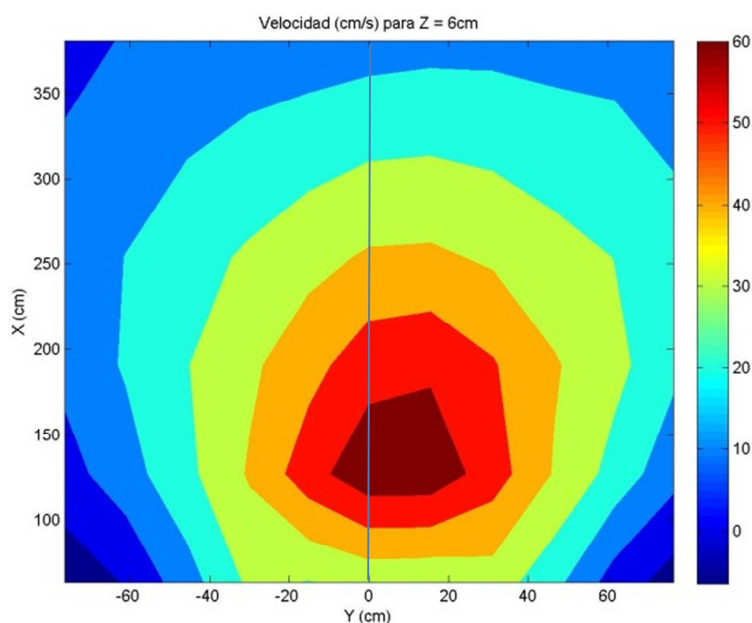


Figura 42 Eje de variaciones de la velocidad en el fondo a una altura de 6 cm (400 rpm)

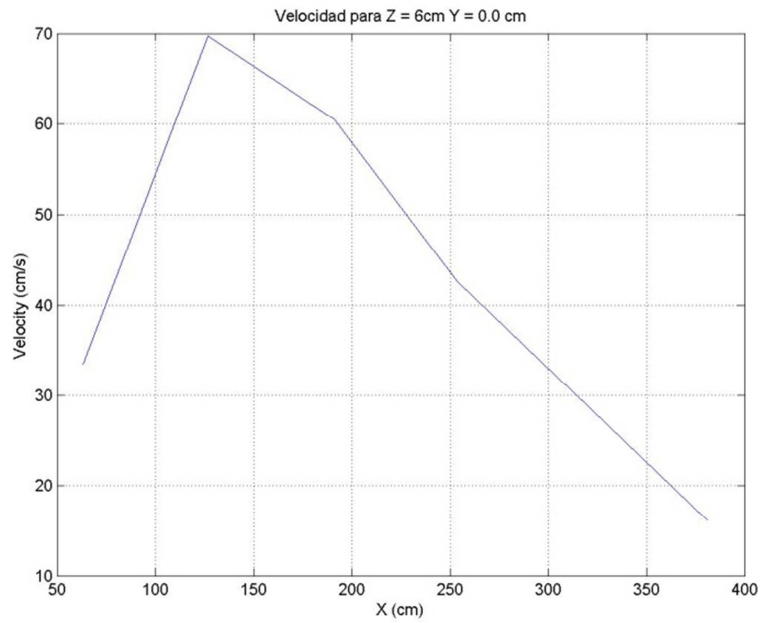


Figura 433 Variaciones de la velocidad en el fondo a una altura de 6 cm (400 rpm)

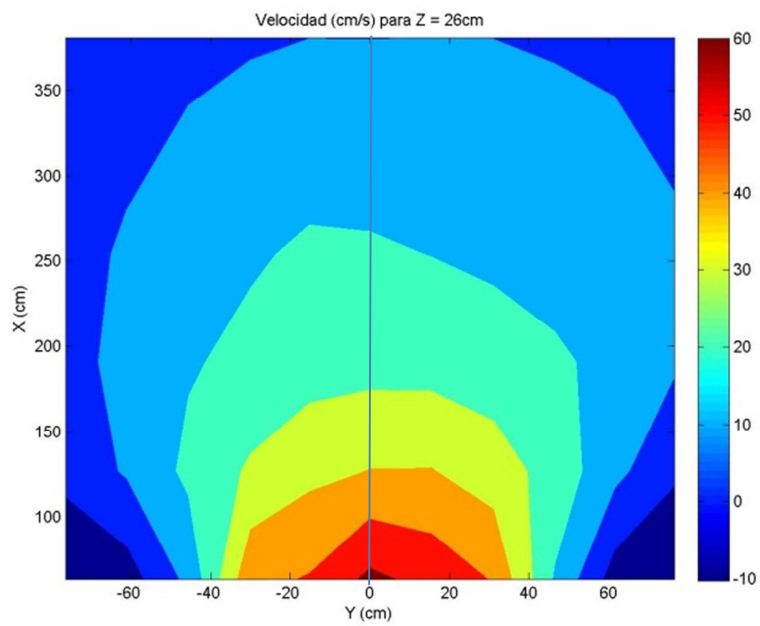


Figura 44 Eje de variaciones de la velocidad en el fondo a una altura de 26 cm (400 rpm)

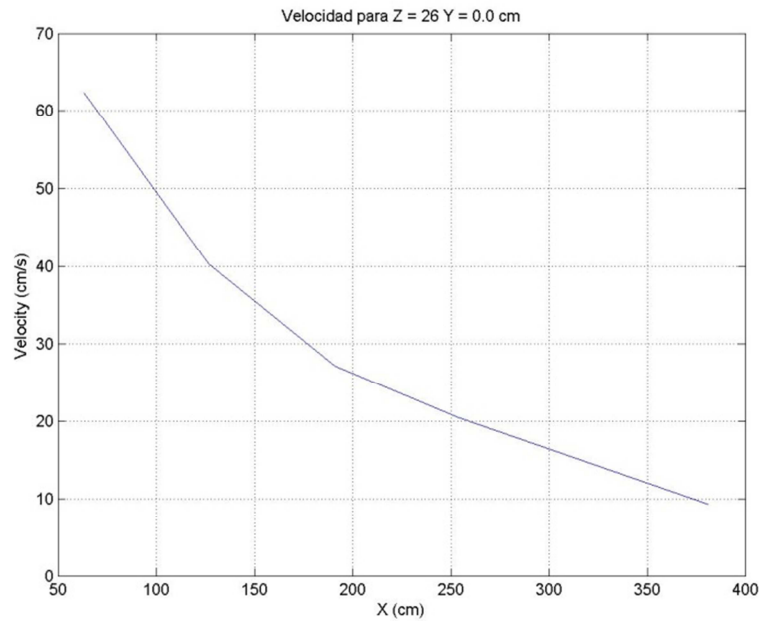


Figura 45 Variaciones de la velocidad en el fondo a una altura de 26 cm (400 rpm)

En la figura 43 se puede observar que las velocidades máximas en el fondo se encuentran a una distancia de 1,3 metros respecto de las hélices y que su valor es muy elevado.

En la figura 45 está representada la velocidad a una altura semejante a la de los ejes de las hélices, se observa que este valor es inferior al que se obtiene cuando la velocidad es medida en el fondo de la piscina, es decir que el chorro de máxima velocidad cuando impacta contra el suelo aumenta la velocidad que llevaba al inicio.

7.7- Comparación velocidad máxima fondo

Como velocidades obtenidas en el fondo a partir de los experimentos se escogen las velocidades obtenidas con los 3 sensores centrales a una altura respecto del fondo de 6 centímetros y a una distancia de las hélices de 130 centímetros. Las velocidades son las siguientes:

$$350 \text{ rpm } V_o = 57.5 \text{ cm/s}$$

$$400 \text{ rpm } V_o = 63.3 \text{ cm/s}$$

Finalmente la tabla comparativa de velocidades queda de la siguiente manera:

Tabla Velocidades 3. Velocidades según autores y medidas en el fondo en cm/s		
Autores \ Rpm	350	400
EAU (2004) Fondo	32.81	34.15
ROM (2011) Fondo	24.24	25.24
Experimento	57.5	63.3

Las velocidades obtenidas a partir de los ensayos con las obtenidas a partir de las fórmulas se parecen más bien poco, esto puede ser debido a que los escenarios para los que se prepararon éstas formulaciones, distan del escenario estudiado durante esta investigación. Pero si se comparan las velocidades de 350 y 400 revoluciones por minuto ahora sí que se puede observar que son mayores las de 400 ya que se encuentra a más distancia de las hélices y su flujo ha podido llegar a la velocidad máxima mientras que la de 350 ya se ha estabilizado.

Un motivo por el cual no cabría esperar valores semejantes de velocidad en el fondo es que posiblemente estas fórmulas no reflejen el uso de dos hélices sino de una, en ese caso es lógico que estos valores sean mayores que los obtenidos a partir de las fórmulas.

7.8- Análisis de los factores influyentes

Como ya se ha dicho con anterioridad se hacen los ensayos en un sistema cerrado (la piscina), mientras que en la realidad no es exactamente así (dársena). También, el flujo generado por el sistema de propulsión se puede encontrar una pared lateral cercana, como por ejemplo el muelle donde atraca el barco y, en otras ocasiones, con una pared frontal al flujo, como por ejemplo ocurre al atracar con la popa al muelle.

Este factor influyente es el que crea que en los laterales de la piscina el agua tenga una componente negativa, es decir, que vaya en dirección contraria al jet que generan las hélices. Seguramente en una situación real podría haber una componente negativa cerca de la pared del muelle pero en el otro lateral esto no sucedería.

Al no haber ese flujo en dirección contraria al jet, este podría no verse tan amortiguado o posiblemente no tan concentrado en una zona tan pequeña, en cuyo caso, si en realidad ocupara más espacio, la velocidad punta descendería manteniendo el caudal. Y debido a que sólo exista una pared, el flujo tendería a dirigirse a la zona opuesta donde ésta no exista.

8- Conclusiones

Se ha generado una base de datos de gran valor para la calibración de modelos numéricos de fluidos de última generación (basados en SPH, OpenFOAM, PFEM;...). Es además, la primera base de datos experimentales realizada con doble hélice.

Las velocidades de salida generadas por hélices en rotación obtenidas en los ensayos realizados son muy parecidas a las obtenidas a partir de las fórmulas derivadas de la teoría del momentum, incluso en el caso de 400 revoluciones por minuto, llegan a coincidir.

Las variaciones entre las velocidades obtenidas a diferentes revoluciones por minuto, en la práctica no han llegado a ser tan amplias como indican las fórmulas. A pesar de que sus diferencias son muy pequeñas que pueden ser causadas por una baja respuesta del flujo a variaciones de rpm en una hélice de tamaño reducido.

La dirección del flujo así como su afectación durante los ensayos, corresponden con los observados en la realidad.

El valor de las velocidades obtenidas en el fondo, indicadoras de la posible erosión, sin embargo no corroboran las fórmulas proporcionadas por la EAU (2004) y PIANC (1997), que proponen valores menores a los obtenidos en los ensayos. Dicha apreciación, pone del lado de la inseguridad dichas propuestas.

Tal como se ha indicado al principio, no consta en el estado del arte trabajos experimentales realizados con doble hélice. Los resultados de los ensayos muestran una concentración de altas velocidades del flujo en el plano de simetría de ambos ejes. En el caso de una sola hélice, el estado del arte indica que se concentra en el plano vertical de simetría que lo contiene.

Finalmente concluir que todos los datos obtenidos forman parte de la primera fase de un proyecto perteneciente al Programa Nacional de Proyectos de Investigación Fundamental que han dado lugar a presentar un artículo en la conferencia *SCACR2015 – International Short Course/Conference on Applied Coastal Research 28th September – 1st October 2015 – Florence, Italy*.

Durante la segunda fase del proyecto, está previsto trabajar con fondo móvil con condiciones de posición y rpm de las hélices similares, para evaluar la erosión y deposición provocada. Durante una tercera fase, se ensayarán también medidas de protección del fondo mediante escolleras.

9- Agradecimientos

Al Proyecto de Investigación BIA2012-38676-C03-01 dentro del "Programa Nacional de Proyectos de Investigación Fundamental en el marco del VI Programa Nacional de Investigación Científica, Desarrollo e Innovación Tecnológica 2008-2011". Financiación: MINECO (Ministerio de Economía y Competitividad) y FEDER (Unión Europea- Fondo Europeo de Desarrollo Regional "Una Manera de hacer Europa"). Gracias a los cuales he podido desarrollar esta investigación.

A Anna Mujal i Colilles, que a pesar de estar indisputada durante toda esta investigación, siempre me ha prestado atención en el menor tiempo posible.

Y también a Xavi Gironella i Cobos por darme la oportunidad de ser partícipe de un proyecto de ámbito nacional.

10- Referencias bibliográficas

- [1]. HECJER, G. E. (1981). *Model-Prototype Comparison of Free Surface Vértices*. ASCE, Journal of the Hydraulics Division, Col1067 HY10. Oct, pp. 1243-1259.
- [2], [3]. OSBORNE, R. (1883). *An experimental investigation of the circumstances which determine whether the motion of water shall be direct or sinuous, and of the law of resistance in parallel channels*. Philosophical Transactions of the Royal Society 174 (0): 935–982. doi:10.1098/rstl.1883.0029. JSTOR 109431.
- [4]. HAMILL GA, RYAN D and JOHNSTON HT (2009). *Effect of rudder angle on propeller wash velocities at a seabed*. Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Maritime Engineering; 162:27–33.
- [5]. BERGH H and CEDERWALL K (1981). *Propeller erosion in harbours*. Bulletin No. TRITA-VBI-107. Stockholm, Sweden: Hydraulics Laboratory, Royal Institute of Technology.
- [6]. FUEHRER M, ROMISCH K.(1987). *Propeller jet erosion and stability criteria for bottom protection of various constructions*. PIANC Bulletin. (58).
- [7]. DARGAHI B.(2003). *Three-dimensional modelling of ship-induced flow and erosion*. Proceeding of the Institution of Civil Engineers: Water & Maritime Engineering; (2):193–220.
- [8]. VAN BLAADEREN EA. (2006) *Modelling bow-thrusters induced flow near a quay wall. Master's thesis*. Delft: University of Technology;.
- [9]. PROSSER M. (1986.) *Propeller induced scour*. Tech. rep., BHRA Project RP A01415. Cranfield: The Fluid Engineering Centre;
- [10]. *Guidelines for the design of armoured slopes under open piled quay walls*. Report of working group 22. Supplement to Bulletin 96.
- [11]. ERNST & SOHN. *Recomendations of the committee for Wwaterfront Structures, Harbours and Waterways*. Berlin.
- [12]. *Guidelines for the design and construction of flexible revetments incorporating geotextiles for inland waterways*. Supplement to Bulletin no. 57.
- [13], [14]. *Recomendaciones para el proyecto y ejecución en Obras de Atraque y Amarre* (Tomo II). Capítulo IV: Definición de los estados y situaciones de proyecto. 334-335.

- [15]. ALT R., WILEY S. (2004). *A generalized wave diagram for moving sources*. The Physics Teacher Vol 42, pp. 526-527
- FRANK M. WHITE. *Fluid Mechanics*. McGraw-Hill.
- RANALD V. GILES. *Mecánica de fluidos e hidráulica*. McGrawHill tercera edición.
- ROBERT, L. MOTT. *Mecánica de fluidos*. University of Dayton sexta edición.
- ROBERT L. MOTT. *Mecánica de Fluidos Aplicada*. PrenticeHall.
- ABRAMOWICZ-GERIGK T. ,(2010). *Distribution of flow velocity generated by propellers of twin propeller vessel*. Scientific Journals, Maritime University of Szczecin.
- LAM W-H. et al (2011), HAMILL G. et al (2011), ROBINSON D et al (2011), RAGHUNATHAN S. et al (2011), SONG Y. et al (2011). *Analysis of the 3D Zone of Flow Establishment from a Ship's Propeller*. KSCE Journal of Civil Engineering.
- LAM W-H. HAMILL G. ROBINSON D. RAGHUNATHAN R. KEE C. *Submerged Propeller Jet*. Virtual Engineering Centre, Queen's University of Belfast Cloreen Park, Malone Road, Belfast BT9 5HN Northern Ireland, School of Civil Engineering, Queen's University of Belfast David Keir Building, Stranmillis Road, Belfast BT9 5AG Northern Ireland
- LAMA W et al (2012), HAMILL G et al (2012). ROBINSON D et al (2012), RAGHUNATHAN S. et al (2012). *Semi-empirical methods for determining the efflux velocity from a ship's propeller*. Elsevier Journal.
- LAM W. et al (2013). HAMILL G. et al (2013). ROBINSON D. et al (2013). *Initial wash profiles from a ship propeller using CFD method*. Elsevier Journal.